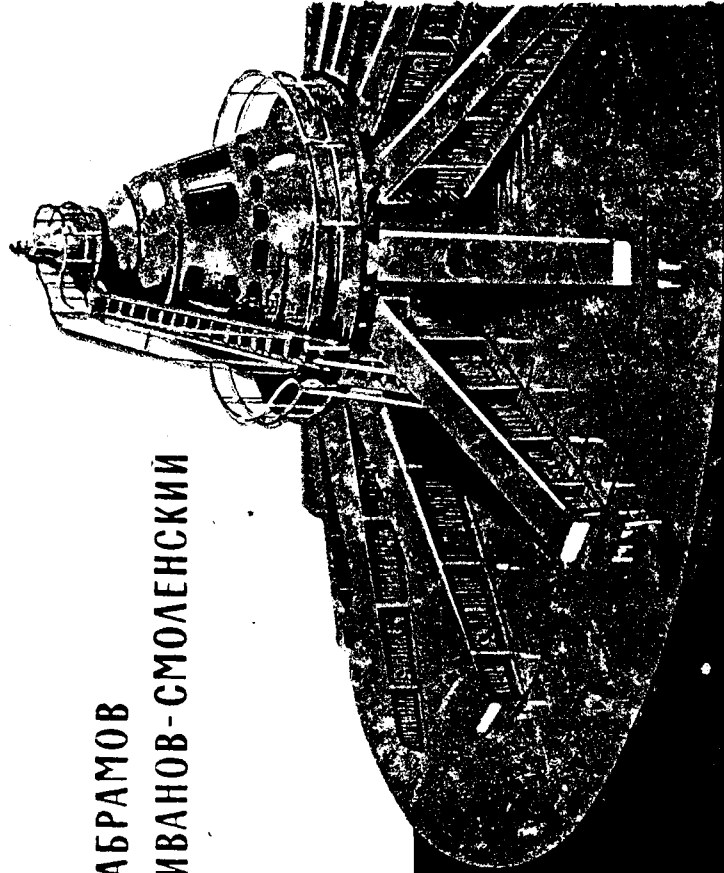


А. И. АБРАМОВ
А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ



Расчет и конструкция гидрогенераторов

А. И. АБРАМОВ, А. В. ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ

Расчет и конструкция гидрогенераторов

*Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов электротехнических
и энергетических
высших учебных заведений*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва — 1964

Посвящается 60-летию
Московского энергетического
института

Переплет художника *Н. Вовка*

554

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современных электрических системах электрическая энергия вырабатывается главным образом на тепловых электрических станциях при помощи турбогенераторов, а на гидроэлектростанциях — при помощи гидрогенераторов.

Поэтому гидрогенераторы и турбогенераторы занимают ведущее место в тематике курсового и дипломного проектирования электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов.

В настоящем пособии приведено описание конструкции гидрогенераторов, обоснован выбор их размеров и изложена методика электромагнитного, теплового, вентиляционного и механического расчетов с краткими пояснениями к расчетным формулам.

Для облегчения изучения материала приведен пример расчета гидрогенератора.

При составлении пособия авторы использовали современную литературу по технологии изготовления, конструкции и расчету гидрогенераторов, сокращенный список которой приведен в конце книги.

Пособие предназначается для студентов электротехнических и энергетических вузов и факультетов и электромеханических техникумов. Оно может быть полезно инженерам и студентам-гидроэнергетикам при проектировании гидроэнергетических установок.

Глава первая

КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

§ 1-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гидрогенераторами называют синхронные генераторы трехфазного тока, приводимые во вращение гидравлическими турбинами. В зависимости от расположения оси ротора (вала) различают горизонтальные и вертикальные гидрогенераторы. По скорости вращения гидрогенераторы делят на тихоходные, средней скорости вращения и быстроходные. По мощности гидрогенераторы разделяют на маломощные, средней мощности и мощные. Резкой границы между этими делениями нет, но как правило, гидрогенераторы со скоростью вращения до 100 об/мин относят к тихоходным, от 100 до 200 об/мин — к средней скорости, свыше 200 об/мин — к быстроходным. Быстроходные гидрогенераторы строят как горизонтальными, так и вертикальными. Тихоходные и средней скорости генераторы строят обычно вертикальными.

В Советском Союзе крупные реки, на которых строят электростанции, в основном являются равнинными реками. Напор на таких гидростанциях невелик и поэтому устанавливаемые на них гидроагрегаты являются тихоходными вертикальными.

Приведем ориентировочные данные на 1960 г. о суммарной мощности установленных гидрогенераторов с различными скоростями вращения, согласно [5].

Скорость вращения, об/мин	Суммарная мощность, %
62,5—88,2	75
88,2—187,5	21
свыше 187,5	4

Наиболее быстроходными мощными вертикальными гидрогенераторами, изготовленными заводом «Электросила», являются гидрогенератор для Гюмушской ГЭС мощностью 66 000 кВа со скоростью вращения 375 об/мин и гидрогенератор для Храмской

ГЭС-2 мощностью 68 750 *кв*а со скоростью вращения 428 *об/мин*. Горизонтальные гидрогенераторы средней и большой мощностей в Советском Союзе не получили широкого применения. Поэтому при описании конструкции в основном рассмотрены вертикальные гидрогенераторы. Конструктивные схемы вертикальных гидрогенераторов изображены на рис. 1-1 и 1-2.

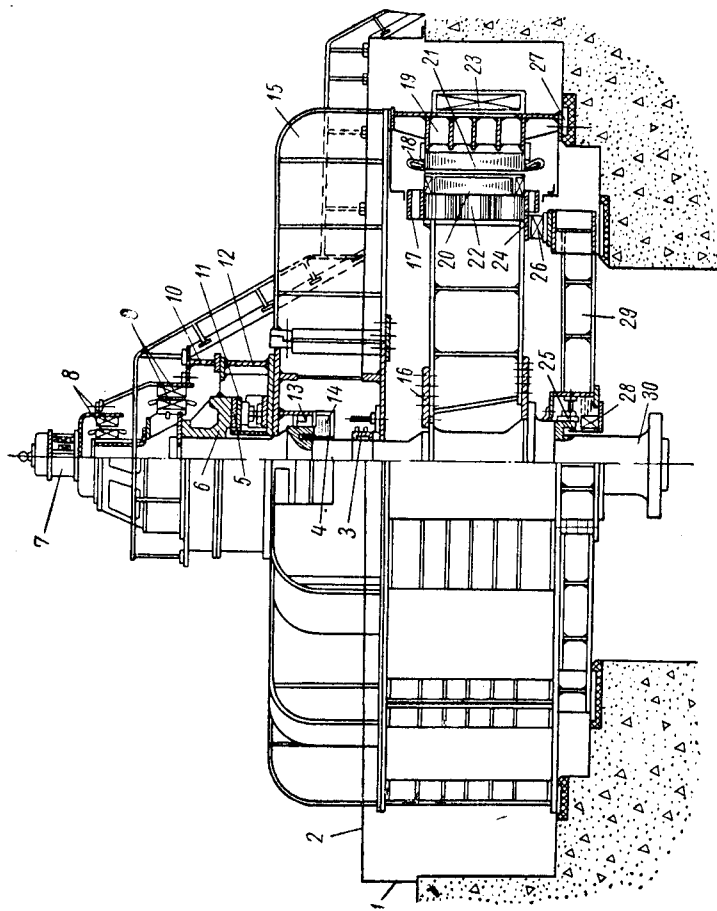


Рис. 1-1. Гидрогенератор подвесного типа на 103500 *кв*а, 83,3 *об/мин*:

1 — кожух генератора; 2 — перекрытые; 3 — контактные кольца; 4 — выгородка масляной ванны; 5 — диск подпятника; 6 — втулка подпятника; 7 — регуляторный генератор; 8 — подводбудитель; 9 — возбуждатель; 10 — подставка под возбуждатель; 11 — неподвижный сегмент подпятника; 12 — масляная ванна подпятника; 13 — верхний направляющий подшипник; 14 — масляная ванна направляющего подшипника; 15 — верхняя крестовина; 16 — диск ротора; 17 — вентилятор; 18 — обмотка статора; 19 — корпус статора; 20 — полюс; 21 — активная сталь; 22 — обод ротора; 23 — воздухоохладитель; 24 — тормозной сегмент; 25 — нижний направляющий подшипник; 26 — тормоз; 27 — фундаментная плита; 28 — маслоохладитель; 29 — нижняя крестовина; 30 — вал

В гидрогенераторе, как и в любой другой электрической машине, различают активные и конструктивные части. К активным частям, непосредственно участвующим в процессе преобразования механической энергии в электрическую, можно отнести сердечник статора с обмоткой, сердечник ротора с обмоткой возбуждения. Остальные части, обеспечивающие надежную работу активных частей, называют конструктивными. К ним относятся вал, корпус

статора, втулка ротора со спицами, крестовины, подпятник, направляющие подшипники, тормоза, охладители и другие. Сердечник статора 21 (рис. 1-1) с обмоткой 18 укрепляют в корпусе статора 19. Корпус статора опирается на фундаментные плиты 27, заделанные

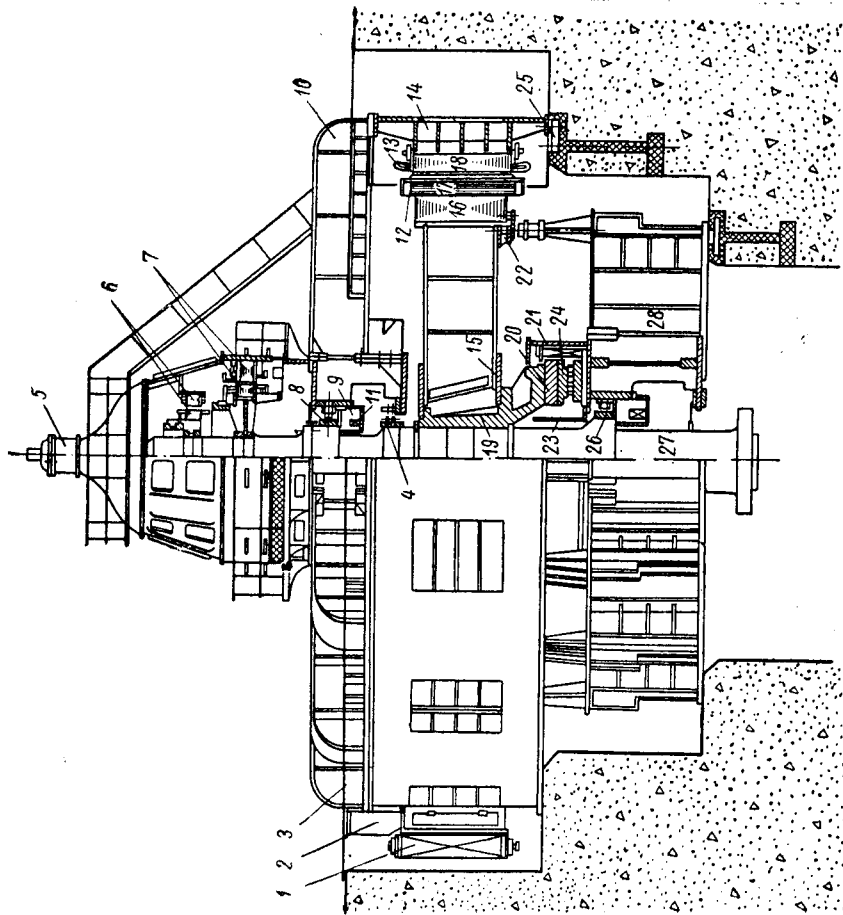


Рис. 1-2. Гидрогенератор зонтичного типа на 103500 *кв*а, 83,3 *об/мин*:

1 — воздухоохладитель; 2 — вывод теплового воздуха в машинный зал; 3 — перекрытые; 4 — контактные кольца; 5 — регуляторный генератор; 6 — подводбудитель; 7 — возбуждатель; 8 — верхний направляющий подшипник; 9 — масляная ванна направляющего подшипника; 10 — верхняя крестовина; 11 — маслоохладитель; 12 — вентилятор; 13 — обмотка статора; 14 — корпус статора; 15 — диск ротора; 16 — обод ротора; 17 — полюс; 18 — активная сталь; 19 — втулка ротора; 20 — диск подпятника; 21 — масляная ванна подпятника; 22 — тормоз; 23 — выгородка; 24 — неподвижный сегмент подпятника; 25 — фундаментная плита; 26 — нижний направляющий подпятник; 27 — вал; 28 — нижняя крестовина

в бетонном основании. На валу, кроме ротора гидрогенератора, размещены якоря машин постоянного тока: возбуждателя 9, служащего для возбуждения полюсов ротора гидрогенератора, и подводбудителя 8, предназначенного для питания независимой обмотки возбуждения возбуждателя.

Для сохранения вертикального положения оси ротора гидроротора и его центрирования относительно статора служат два направляющих подшипника, размещаемых ниже и выше ротора, соответственно в нижней (под ротором) и верхней (над ротором) крестовинах. Может быть и один направляющий подшипник, размещаемый в нижней или верхней крестовине. Тогда вторым направляющим подшипником оси гидроагрегата гидрогенератор — турбина служит подшипник турбины, размещаемой в шахте под генератором. Валы гидрогенератора и турбины соединяют жестко.

Нагрузку от веса ротора гидрогенератора, рабочего колеса турбины и вертикальной составляющей давления воды на рабочее колесо воспринимает опорный подшипник, который называют подшипником. Подпятник передает вертикальные усилия крестовине, которую в этом случае называют грузонесущей или опорной.

В зависимости от расположения подпятника относительно ротора различают подвесные и зонтичные гидрогенераторы.

В *подвесном* гидрогенераторе (рис. 1-1) подпятник находится над ротором в верхней грузонесущей крестовине. Направляющих подшипников может быть два или один. При одном направляющем подшипнике он размещается в верхней крестовине, часто в одной ванне с подпятником.

В *зонтичном* гидрогенераторе (рис. 1-2) подпятник находится под ротором в нижней крестовине, которая в этом случае является грузонесущей. Направляющих подшипников может быть два или один, расположенный в верхней или в нижней крестовине.

Установить точные границы целесообразного применения подвесного или зонтичного типа гидрогенератора довольно трудно. Обычно рассматривают все преимущества и недостатки обоих типов гидрогенераторов конкретно для каждой проектируемой машины.

В гидрогенераторе *подвесного типа* значительно выше механическая устойчивость (особенно если машина имеет сравнительно небольшой диаметр и большую длину), обеспечивается более свободный доступ к подпятнику и другим частям машины. Поэтому этот тип генератора является предпочтительным до тех пор, пока он практически осуществим без значительных конструктивных усложнений. Применение гидрогенератора подвесного типа определяется диаметром статора и нагрузкой на подпятник, от которых в свою очередь зависят вес и размеры верхней опорной крестовины, возможность ее изготовления и транспортирования по железной дороге. К недостаткам подвесного типа гидрогенератора следует отнести его несколько большую высоту по сравнению с зонтичным типом при прочих равных условиях.

Подвесными обычно выполняют гидрогенераторы со средними и высокими скоростями вращения, имеющие большую длину и относительно небольшие диаметры статоров. В мощных тихоходных гидрогенераторах при больших давлениях на подпятник и большом диаметре статора верхняя грузонесущая крестовина в подвесном

типе участвует очень громоздкой. Поэтому целесообразно применение зонтичного типа гидрогенератора. Опорной крестовиной в зонтичном гидрогенераторе является нижняя крестовина, опирающаяся на выступы в шахте турбины и имеющая поэтому значительно меньший диаметр и вес, чем верхняя грузонесущая в подвесном гидрогенераторе. Дальнейшим развитием гидрогенераторов зонтичного типа явился отказ в некоторых конструкциях от нижней грузонесущей крестовины и расположение подпятника на конусообразной опоре, установленной на крышке турбины.

Такая конструкция применена, например, в гидрогенераторах Камской, Цимлянской и волжских ГЭС. Эта модификация зонтичного типа гидрогенератора, несмотря на некоторое усложнение крышки турбины, позволяет получить значительную экономию не только в весе агрегата, но и в стоимости здания станции. Выполнение волжских (рис. 1-3) гидрогенераторов зонтичными без опорных крестовин с установкой подпятника на крышке турбины позволило сократить высоту агрегата примерно на 2 м и сэкономить около 150 т конструкционной стали на каждый агрегат.

Один из построенных в последнее время гидрогенераторов для Братской ГЭС (рис. 1-4) имеет мощность 264 700 *квт* при скорости вращения 125 *об/мин*. Несмотря на большие размеры (диаметр ротора статора 10 500 мм, длина активной стали 2500 мм), он выполнен подвесным. Нагрузка на подпятник, достигающая 1600 т, передается на мощную верхнюю крестовину, состоящую из центральной части и 12 отъемных лап двугривового сечения. Генератор выполнен без нижней крестовины. Это позволило сэкономить около 50 т стали и уменьшить высоту генератора примерно на 1 м.

Стремление удешевить строительство гидроэлектростанции приводит к созданию машин меньшего веса и размеров, к росту единичной мощности машин путем применения более эффективного непосредственного охлаждения меди обмоток воздухом и жидкостного охлаждения обмоток. Охлаждение обмоток водой, например, дает возможность увеличить почти в два раза мощность гидрогенератора в тех же габаритах по сравнению с машинами воздушного охлаждения. При этом расход активной стали на 1 *квт* уменьшается примерно в 1,5—2 раза, меди — в 3—4 раза.

В настоящее время разработаны проекты гидрогенератора для Красноярской ГЭС мощностью в 590 000 *квт* (500 000 *квт*), что примерно равно мощности Днепрогэса. Выполнение такой машины с обильным воздушным охлаждением затруднительно, поэтому необходимо применять форсированное воздушное охлаждение или охлаждение водой.

В табл. 1-1 приведены основные технические данные двух вариантов гидрогенератора для Красноярской ГЭС по проектам, выполненным на заводе «Уралэлектрораппарат». Вариант 1 — форсированное воздушное охлаждение статора и внутрипровоодниковое воздушное охлаждение обмотки ротора. Вариант 2 — внутрипрово-

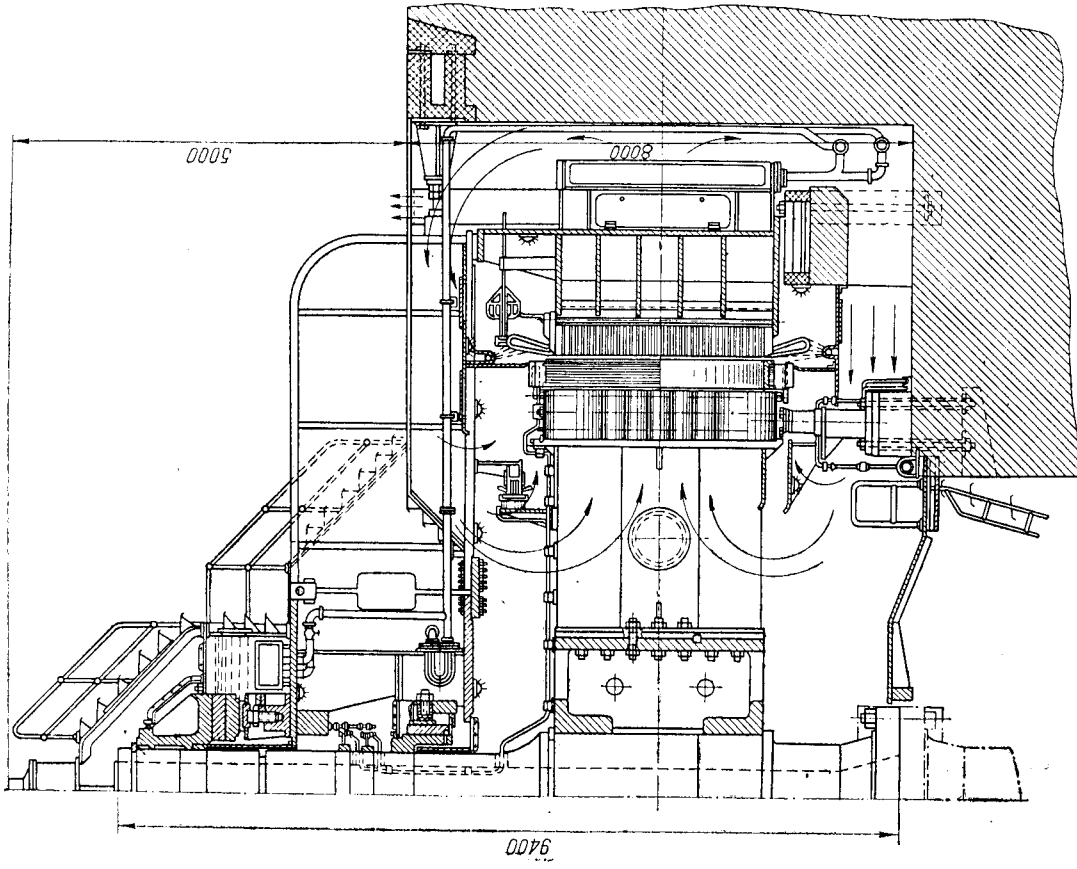


Рис. 1-4. Гидрогенератор Братской ГЭС

водникового водяное охлаждение обмотки статора и внутрипроводни-
 ковое воздушное охлаждение обмотки ротора. В обоих вариантах
 обмотку возбуждения выполняют из алюминия, что позволяет сэко-
 номить около 70 т меди на каждую машину по сравнению с вариан-
 том обычного исполнения обмотки возбуждения без внутрипро-
 водникового охлаждения.

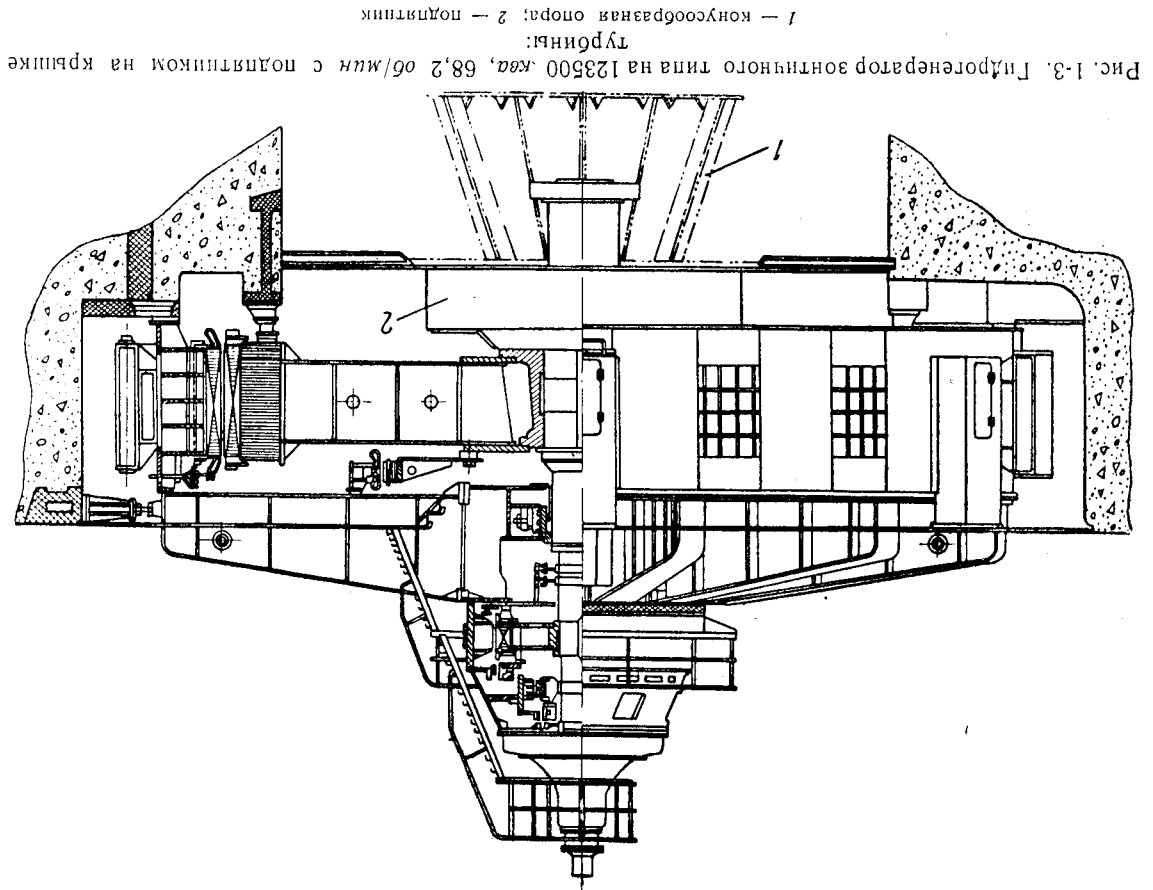


Рис. 1-3. Гидрогенератор зонтичного типа на 123500 кВА, 68,2 об/мин с подпятником на крышке турбины:

1 — конусообразная опора; 2 — подпятник

Таблица 1-1
Основные технические данные двух вариантов гидрогенератора для Красноярской ГЭС

Параметры	Единицы измерения	Вариант	
		1	2
Мощность	квт	500000	500000
Напряжение	кв	590000	590000
Ток статора	кв	15,75	15,75
Скорость вращения	ка	21,6	21,6
Диаметр расточки статора	об/мин	93,8	93,8
Длина сердечника статора с каналами	мм	16500	16600
Длина воздушного зазора (односторонняя)	мм	2600	1800
Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси x_d'	д/ед	1,12	1,28
Переходное синхронное реактивное сопротивление по продольной оси x_d''	д/ед	0,36	0,425
Сверхпереходное синхронное реактивное сопротивление по продольной оси x_d'''	д/ед	0,22	0,27
Коэффициент полезного действия η	%	98,5	98,1
Маховой момент ротора	тыс. Тм ²	194	187
Общий вес электротехнической стали (числительный вес)	т	348	246
Общий вес меди	т	56,2	27,4
Общий вес алюминия	т	24,5	19,5
Общий вес генератора в сборе без вспомогательного генератора	т	1905	1655
Ориентировочная стоимость генератора	млн. руб	1,7	1,5

Из табл. 1-1 видно, что применение водяного охлаждения обмотки статора (вариант 2) позволяет в значительной степени снизить размеры генератора, вес электротехнической стали, меди и общий вес генератора по сравнению с вариантом 1, в котором применено форсированное воздушное охлаждение статора. Надо отметить, что непосредственное охлаждение обмоток водой будет применяться в дальнейшем не только в наиболее мощных гидрогенераторах, но и в гидрогенераторах средних мощностей, так как это дает большую экономию активных и конструктивных материалов, уменьшает размеры машин и приводит к удешевлению строительства гидроэлектростанций.

Рассмотрим более подробно конструкцию отдельных частей гидрогенератора.

§ 1-2. КОРПУС СТАТОРА

Корпус статора является конструктивной частью гидрогенератора и служит для крепления в нем сердечника статора с обмоткой. По условиям перевозки по железной дороге статоры с наружным

диаметром, равным более 4 м, выполняют разъемными из двух, четырех или шести секторов, называемых соответственно двойками, четверками и шестерками.

Корпус статора (рис. 1-5) представляет собой конструкцию, сваренную из отдельных заготовок, вырезанных из толстолистового проката. Гибку заготовок выполняют на гибочных станках. Корпус состоит из нескольких рядов горизонтальных полок, верхнего

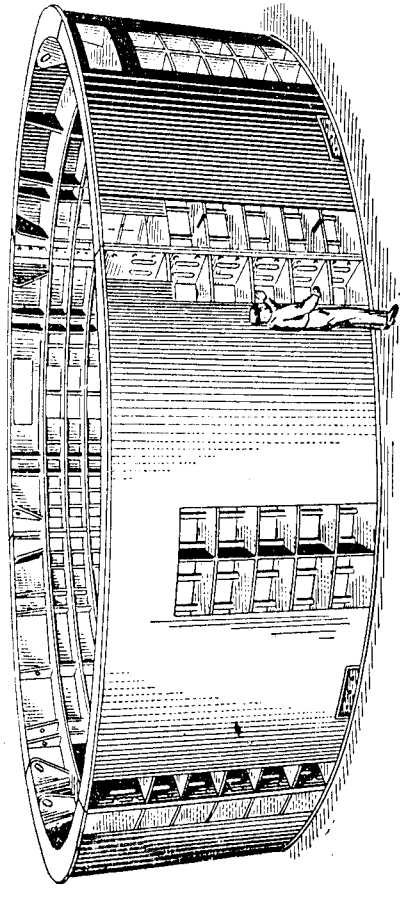


Рис. 1-5. Корпус статора

и нижнего поясов, связанных между собой распорными угольниками и ребрами жесткости. По наружной цилиндрической поверхности корпус закрывают обшивкой из листового стали. В обшивке оставляют окна для выхода горячего воздуха из машины. В этих местах в гидрогенераторах устанавливают воздухоохладители. По обоим торцам секторов корпуса статора (двоек, четверок или шестерок) приваривают стыковые плиты. При помощи шпилек, вставленных в отверстия плит, два смежных сектора соединяют между собой. В разъемных статорах стыковые плиты должны плотно и точно прилегать друг к другу. Это обеспечивается соответствующей технологией их установки. Перед приваркой плиты предварительно обрабатывают, попарно сболчивают и заштифтовывают в плоскости разъема.

К полкам корпуса статора с внутренней стороны приваривают клинья-ребра по образующей цилиндрической поверхности. Внутреннюю сторону клиньев (сторона, противоположная месту приварки) обрабатывают по форме ласточкина хвоста для сборки на них сегментов стали сердечника статора.

§ 1-3. СЕРДЕЧНИК СТАТОРА

Сердечник статора собирают (шихтуют) из сегментов, изготовляемых методом холодной штамповки из электротехнической стали

толщиной 0,5 мм как горячекатаной с содержанием кремния до 4% (Э41, Э42), так и холоднокатаной (Э310, Э320, Э330).

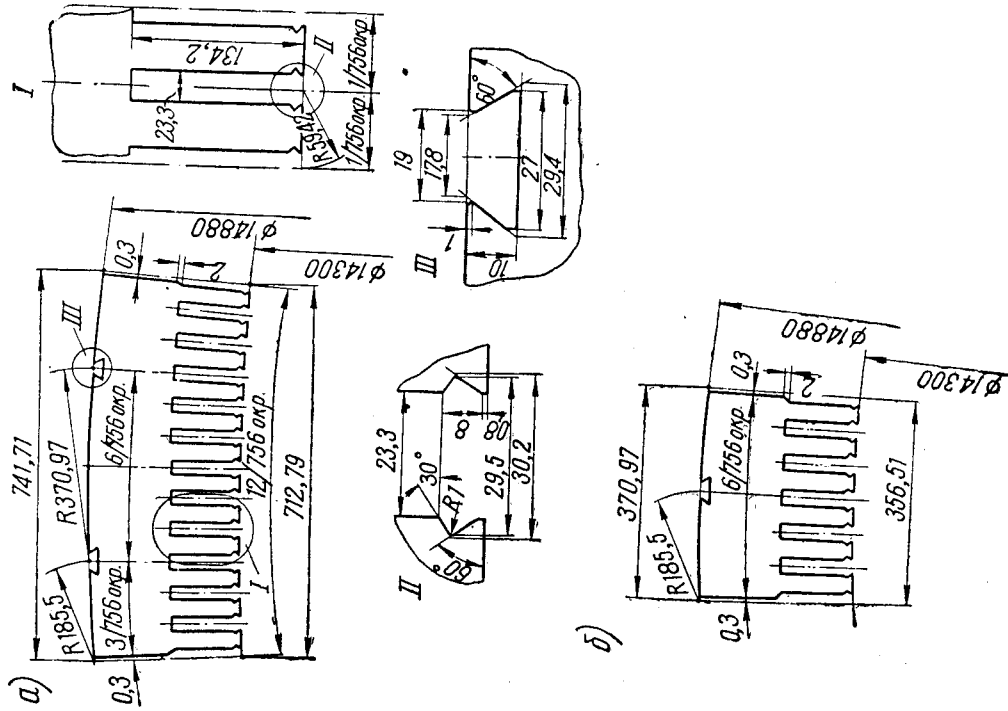


Рис. 1-6. Сегменты сердечника статора:
а) — основной; б) — дополнительный

Имеется четыре типа сегментов, из которых шихтуется сердечник: основные, дополнительные, крайние и вентиляционные. Примерно 90% всех сегментов сердечника статора составляют основные сегменты (рис. 1-6, а). Пазы на внешней дуге ласточкина хвоста предназначены для сборки сегментов на клинья-ребра корпуса статора. Пазы на внутренней дуге открытые, прямоугольной формы; они предназначены для стержней обмотки.

Дополнительные сегменты (рис. 1-6, б), равные по площади половине основного сегмента (или какой-либо части его), необходимы для обеспечения перекрытия одного слоя сегментов относительно другого и разбега статора на секторы.

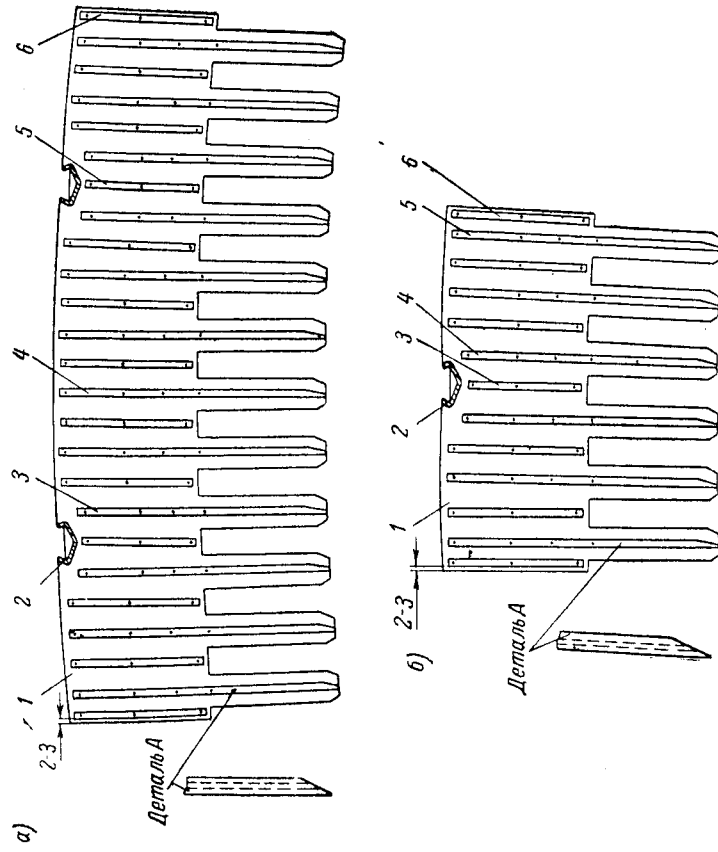


Рис. 1-7. Вентиляционные сегменты сердечника статора:
а) — основной; б) — дополнительный; 1 — сегмент; 2 — распорка, надеваемая на клин; 3, 4, 5, 6 — распорки специального профиля

Крайние сегменты имеют меньшую высоту зубцов и предназначены для обеспечения жесткости крайних пакетов. Их получают из основных сегментов путем обрубки по внутреннему радиусу.

Вентиляционные сегменты отличаются от основных тем, что к их плоскости приварены вентиляционные распорки высотой в 1 см, как показано на рис. 1-7. Они предназначены для образования радиальных вентиляционных каналов между пакетами сердечника статора, через которые проходит воздух, охлаждающий статор.

Зубцы вентиляционных сегментов немного короче и уже, чем у основных сегментов. Это сделано для того, чтобы они не выступали в паз, если их покоробит при приварке распорки. После штамповки сегменты статора имеют на контуре вырубку грат (заусенцы), который в собранном сердечнике замыкает листы стали между

собой, что вызывает дополнительные потери стали, ее повышенный нагрев и уменьшение к. п. д. Поэтому после штамповки сегменты проходят операцию «снятия грата» на гратоснимательном станке. Очищенные от грата сегменты покрывают масляно-смоляными или битумно-масляно-смоляными лаковыми лаками горячей сушки. Лаковая пленка, односторонняя толщина которой составляет примерно 0,05 мм, создает хорошую изоляцию между листами в собранном сердечнике и предохраняет листы стали от коррозии.

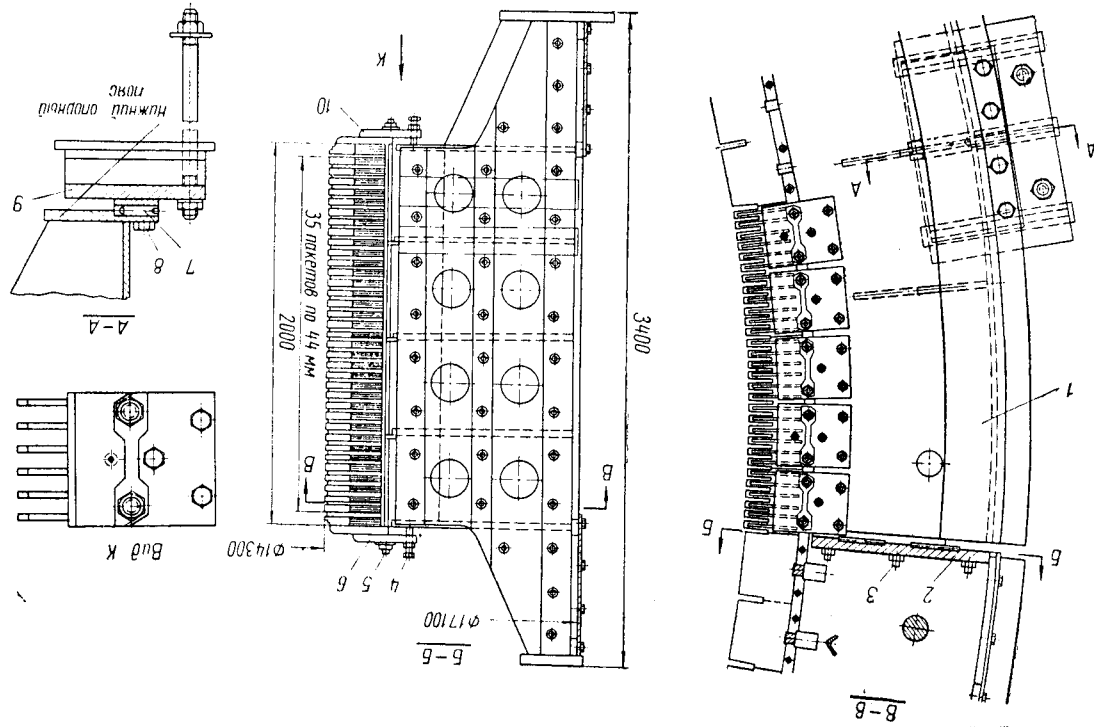
Процесс сборки сердечника на клинья-ребра корпуса статора очень трудоемок. Количество сегментов активной стали, например, для волгоградского гидрогенератора составляет 200 000 штук. Сборку производят вручную. При оптимальном количестве рабочих процесс сборки сердечника статора волгоградского генератора длится 20 суток. Сердечник статора в процессе сборки опрессовывается домкратами и в собранном виде удерживается от распухания нажимными гребенками, установленными по торцам сердечника, и стянутыми стяжными шпильками, как показано на рис. 1-8. Перед укладкой обмотки пазы статора тщательно осматривают, чтобы не было смещения отдельных листов стали, могущих повредить изоляцию обмотки. Углы зубцов тщательно зашлифовывают, проверяют правильность расположения нажимных пальцев гребенок — они должны быть расположены точно по середине зубцов. Вся активную сталь продувают сухим сжатым воздухом и покрывают битумно-бензольным лаком.

§ 1-4. ОБМОТКА СТАТОРА

Обмотки статоров гидрогенераторов выполняют обычно двухслойными катушечными или стержневыми. В гидрогенераторах небольшой мощности и невысокого напряжения удаётся выполнить обмотку двухслойной стержневой. При более высоком напряжении и относительно небольшой мощности гидрогенератора применяют катушечную двухслойную обмотку с числом витков в катушке, большим единицы (рис. 1-9). Выполнение стержневой обмотки (при одном витке в катушке) в этом случае затруднительно (или вовсе невозможно), так как требуется настолько большое число пазов статора и соответственно малое зубцовое деление, что в пазу невозможно разместить соответствующего сечения проводник и изоляцию. В крупных гидрогенераторах, где возможно применение катушечной и стержневой обмоток, обычно выбирают двухслойную (реже однослойную) стержневую обмотку, так как существенным недостатком катушечной обмотки является наличие витковой изоляции, которая часто повреждается при волновых процессах.

Рассмотрим конструктивные особенности стержневой обмотки. Стержни обмотки для уменьшения потерь от вихревых токов, наведенных пазовым полем рассеяния, изготавливают из элементарных

Рис. 1-8. Неомотанный статор волгоградского гидрогенератора: 1 — сектор (шестерка) статора; 2 — стальные плиты; 3 — стяжная шпилька плит; 4 — регулирующий болт нажимных гребенок; 5 — стяжная шпилька активной стали; 6 — верхняя нажимная гребенка; 7 — штифт; 8 — болт, крепящий фундаментную плиту; 9 — фундаментная плита; 10 — нижняя нажимная гребенка



медных проводников сечением 10—15 мм². Материалом для проводников служит медный обмоточный провод марки ПДА (ГОСТ 7019—54), изолированный одним слоем дельта-асбестовой изоляции с подклейкой и пропиткой теплостойким лаком, или провод ПСД.

Для уменьшения погерь от циркуляционных токов, являющихся следствием эффекта вытеснения тока в стержне к раскрытию паза, элементарные проводники в пазовой части стержней переплетают (транспонируют), как показано на рис. 1-10. Перед наложением корпусной изоляции стержень компаундируют. Это необходимо для того, чтобы заполнить массой все пустоты в стержне и пропитать компаундом изоляцию элементарных проводников. На окончательно отформованный стержень накладывают корпусную изоляцию из микаленты. Количество слоев микаленты зависит от номинального напряжения изготовляемого генератора. В процессе наложения микалентной изоляции стержень подвергают компаундировке несколько раз (в зависимости от количества слоев микаленты).

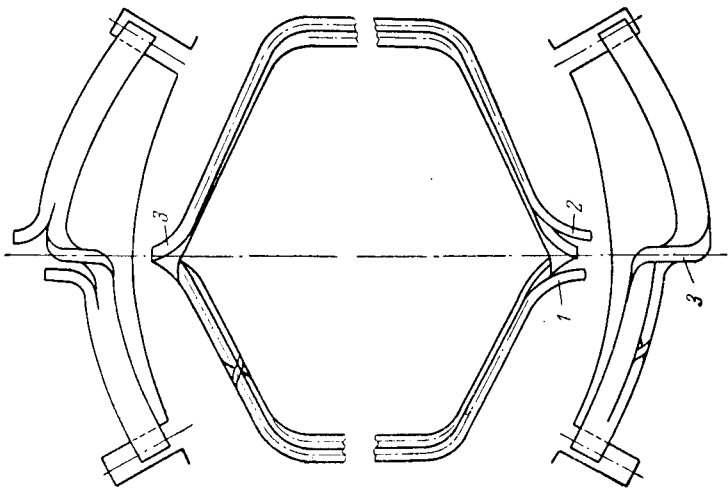


Рис. 1-9. Двухвитковая катушка двойной обмотки статора:
1, 2 — начало и конец катушки; 3 — головка катушки

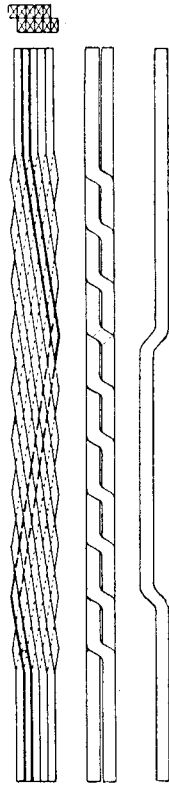


Рис. 1-10. Транспонированный стержень обмотки статора

В процессе компаундировки производят вакуумную сушку и удаляют при этом растворитель из всех слоев микаленты, а также опресовывают стержень в целях приближения его размеров к расчетным.

Компаундированная изоляция стержня хорошо противостоит увлажнению и менее подвержена разрушению от коронирования. Для снижения коронирования и сохранения наружного слоя изоляции стержни покрывают полупроводящими сажными лаками. Концы стержня очищают от загрязнений, загибают на оправке по размеру и облуживают. После испытания изоляции стержней

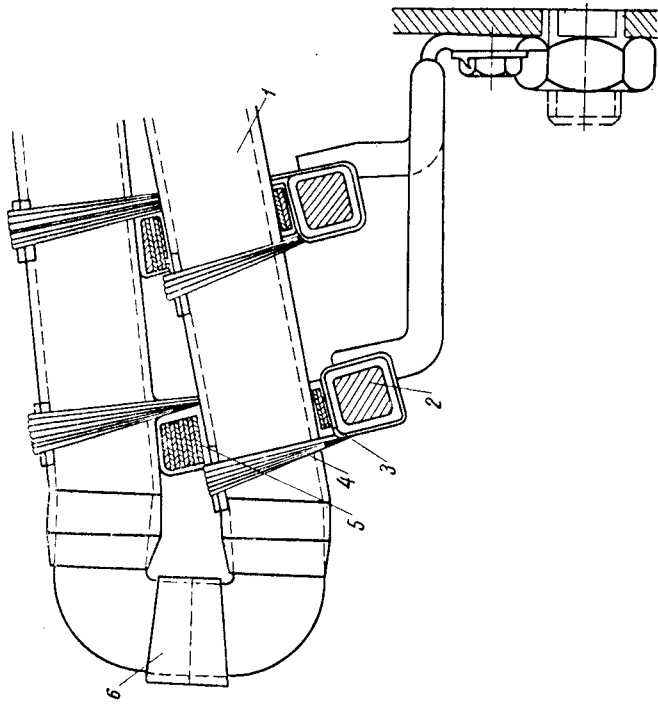


Рис. 1-11. Крепление лобовых частей обмотки к бандажным кольцам

на электрическую прочность и диэлектрические потери их подают на участок обмотки, где укладывают в пазы сердечника статора.

В разъемном статоре обмотку укладывают по отдельным секторам. Нескольким крайним пазам, называемым стыковыми, не заполняют обмоткой на заводе. Стержни обмотки укладывают в них при сборке статора в кольцо на монтаже. Для предохранения от повреждения стыковые пазы заполняют на заводе брусками из сухого дерева. В остальные пазы сначала укладывают стержни нижнего ряда обмотки.

Для размягчения изоляции, необходимого при механической подгонке обмотки, стержни перед укладкой помещают в термостат на 30—45 мин и нагревают до температуры 85—100° С.

Пазовая часть стержня должна плотно прилегать к дну паза. Лобовую часть стержня 1 при необходимости подрихтовывают для того, чтобы она плотно ложилась на бандажные кольца 2

(рис. 1-11), к которым ее подтягивают шнуровым бандажом 4, а между стержнями прокладывают дистанционные прокладки. При необходимости (например, при частичном эллипсе бандажного кольца) между стержнями и бандажным кольцом прокладывают лакированные картонные полосы 3.

Перед укладкой верхнего ряда обмотки стержни нижнего ряда подвергают испытанию высоким напряжением относительно корпуса, продувают сжатым воздухом, а лобовые части обмотки покрывают битумно-масляным лаком. На головки нижних стержней надевают медные облуженные хомутики 6. Далее, выполняя соответствующую технологию, закладывают стержни верхнего ряда. Головки стержней верхнего ряда заводят в хомутики 6, и осаживают стержни на место, заклинивая их временными пазными клиньями.

В процессе укладки обмотки в пазы закладывают термосопровитвления, предназначенные для контроля температуры. Термосопровитвления закладывают на дно паза, между стержнями верхнего и нижнего рядов в пазной части и между стержнем верхнего и клином. Между лобовыми частями стержней нижнего и верхнего рядов в месте установки бандажей укладывают буфер 5 из набора полосок лакированного картона, стянутых лентой. После установки шнурового бандажа стержни верхнего ряда плотно лежат на буфере, а стыки концов стержней верхнего и нижнего рядов плотно сходятся и их можно прочно спаять.

При пайке припой заполняет все пространство между хомутиком и проводниками стержней, прочно соединяя стержни между собой. Пайку производят припоем ПОС-40. Следует заметить, что места соединений стержней обмотки чаще подвергаются разрушению, чем целые части обмотки. Это происходит потому, что в местах пайки, если она произведена не очень качественно, происходит местный нагрев вследствие повышенного сопротивления и припой выплавляется. Эффективных же методов обнаружения дефектных контактов не существует. Поэтому в последнее время заводы переходят на пайку твердым припоем, что повышает эксплуатационную надежность генератора. Из твердых припоев наиболее подходящим для этих целей являются серебряные припои, например ПСр-15, обладающий высокой растекаемостью и смачиваемостью. Пайку твердым припоем производят сжатием узла пайки губками клещей с графитовыми электродами и последующим пропуском электрического тока.

Контроль паяк можно осуществить ультразвуковым способом. После пайки головок, стержней межполюсных соединений, токопроводящих шин все места паяк зачищают, изолируют микалентой и стеклолаколотной и покрывают изоляционным лаком. После этого пазы заклинивают специальными клиньями, вентиляционные скосы которых должны совпадать с направлением вращения ротора и с вентиляционными каналами сердечника статора.

§ 1-5. ВЛИЯНИЕ УГОННОЙ СКОРОСТИ НА КОНСТРУКЦИЮ РОТОРА

Сопряжение ротора гидрогенератора с гидравлической турбиной вносит в его конструкцию существенные усложнения потому, что гидравлическая турбина обычно имеет максимальный к. п. д. при скорости вращения, в два-три раза меньшей максимальной скорости, которую она может развивать без нагрузки.

Чтобы экономично использовать энергию воды, номинальный режим турбины рассчитывают при максимальном к. п. д. Поэтому, если при номинальной нагрузке, когда проходящий через турбину поток воды создает номинальный крутящий момент, происходит внезапный сброс нагрузки с генератора, т. е. происходит резкое снижение (почти до нулевого значения) противодействующего момента, гидроагрегат за несколько секунд может раскрутиться до скорости, равной максимальной скорости турбины.

Для предотвращения увеличения скорости вращения агрегата при внезапном сбросе нагрузки с генератора требуется уменьшить почти до нулевого значения крутящий момент, создаваемый потоком воды, проходящим через турбину. Это осуществляется системой регулирования турбины, которая воздействует на лопатки направляющего аппарата. Лопатки закрываются, и подача воды на лопасти рабочего колеса почти полностью прекращается.

При исправной работе системы регулирования гидротурбины, т. е. при своевременном закрытии лопаток направляющего аппарата, агрегат успеет увеличить скорость вращения всего лишь на 30—35% выше номинальной.

В случае неисправной работы системы регулирования, когда после сброса нагрузки с генератора направляющий аппарат турбины остается полностью открытым и турбина развивает максимальный крутящий момент, агрегат развивает максимальную скорость вращения, превышающую номинальную в два-три раза. Эту максимальную скорость называют *угонной*.

Увеличение скорости при сбросе нагрузки принято характеризовать коэффициентом угонной скорости, равным отношению угонной скорости вращения n_y к номинальной n_n ,

$$k_y = \frac{n_y}{n_n}.$$

Коэффициент угонной скорости k_y имеет следующие значения для различных типов турбин: для ковшевых турбин 1,8, для радиально-осевых турбин 1,8—2,2, для поворотно-лопастных турбин 2,5—3,5.

Согласно ГОСТу 5616—50 гидрогенераторы должны без вредных последствий выдерживать угонную скорость вращения в течение 2 мин. Следовательно, все вращающиеся части гидрогенератора необходимо рассчитывать не на номинальную, а на угонную скорость, при которой центробежные силы, пропорциональные

квадрату угловой скорости, значительно возрастают. Так, например, при угонной скорости, превышающей номинальную в три раза, центробежные силы и механические напряжения во вращающихся частях возрастают в девять раз по сравнению с номинальными.

Угонная скорость не должна вызывать в роторе генератора остаточных деформаций. Вес ротора возрастает за счет увеличения сечения магнитного обода, который должен выдерживать при угонной скорости не только собственную центробежную силу, но и центробежную силу полюсов, укрепленных на обode. В ряде случаев при угонной скорости вращения центробежная сила в 1000 раз превышает собственный вес детали. Так, если вес полюса составляет 100 кг, то центробежная сила, действующая на полюс в радиальном направлении, составит 100 т. Поэтому крелление полюсов к ободу ротора представляет немалые трудности и нередко вносит в конструкцию ротора значительные усложнения.

При таких больших центробежных силах особое значение имеет тщательная балансировка ротора. При небалансах ротора в 5—10 кг одностороннее радиальное усилие, воспринимаемое направляющими подшипниками гидрогенератора, при угонной скорости вращения может составить 5—10 т.

§ 1-6. ВЛИЯНИЕ МАХОВОГО МОМЕНТА НА КОНСТРУКЦИЮ РОТОРА

Гидравлическая турбина в конструкции гидрогенератора требует обеспечения достаточно большого значения махового момента ротора. Как двигатель она позволяет поддерживать во всех режимах работы генератора постоянную синхронную скорость вращения.

Изменению противодействующего момента генератора, связанного с изменением его нагрузки, соответствует одновременное изменение вращающего момента турбины. При нарушении равновесия скорость вращения отличается от синхронной. Для поддержания постоянства скорости вращения генератора при изменении режима работы устанавливаются регуляторы скорости. Обладая известным запаздыванием, необходимым для того, чтобы избежать гидравлического удара, регуляторы не могут обеспечить быстрого изменения расхода воды, поступающей в турбину и, следовательно, не могут быстро изменить крутящий момент турбины при изменении противодействующего момента.

Чтобы скорость генератора оставалась практически постоянной за время срабатывания системы регулирования, необходимо, чтобы ротор агрегата обладал определенным запасом кинетической энергии, которая при заданной скорости вращения характеризуется величиной махового момента GD^2 . Здесь G — вес вращающихся частей агрегата, D — диаметр инерции массы ротора отно-

сительно оси вращения. Чем больше маховой момент ротора при той же скорости, тем больше кинетическая энергия, запасенная ротором, тем меньше изменяется его скорость вращения при изменении нагрузки. Накапливая кинетическую энергию при ускорении вращения и отдавая ее при замедлении вращения, ротор агрегата является своеобразным аккумулятором кинетической энергии.

Маховой момент агрегата определяется главным образом по значению махового момента ротора гидрогенератора, так как маховой момент рабочего колеса турбины, вследствие малого его диаметра и относительно небольшого веса, составляет лишь небольшую часть от махового момента агрегата.

Маховой момент пропорционален квадрату диаметра инерции массы ротора, поэтому для обеспечения необходимого махового момента гидрогенераторы выполняют с большими диаметрами роторов и небольшими длинами сердечников статоров. В отдельных случаях, даже при большом диаметре ротора, для обеспечения необходимого махового момента обод ротора утяжеляют путем увеличения его размеров.

§ 1-7. ОСТОВ РОТОРА

К конструкции ротора, кроме требований механической прочности при угонной скорости вращения и обеспечения соответствующего махового момента, предъявляются требования технологичности: простота исполнения, меньшая трудоемкость изготовления; кроме того, необходимо предусматривать возможность транспортировки ротора на место монтажа в разобранном виде, если его размеры превышают железнодорожные габариты.

Основными частями ротора, определяющими его конструкцию, являются остов и обод. Остов — внутренняя часть ротора, насаживаемая на вал, представляет собой конструктивную часть, на которую крепят обод. Обод — наружная часть ротора, на которой укреплена полюсы с обмоткой, является не только конструктивной, но и активной частью, так как по нему замыкаются силовые линии главного магнитного поля.

В Советском Союзе изготавливаемые гидрогенераторы имеют остовы роторов двух типов: дисковые и спицевые, применение которых определяется их внешними диаметрами. Остовы, имеющие внешний диаметр до 4 м, выполняют неразъемными дисковыми, остовы с диаметром до 8 м — разъемными дисковыми или спицевыми, свыше 8 м — разъемными спицевыми.

Ротаторы с дисковым остовом

В быстроходных гидрогенераторах применяют неразъемный дисковый остов, который одновременно является и ободом ротора

(рис. 1-12). Остов выполняют из отдельных пакетов, состоящих из стальных дисков 2. Контуры дисков, отверстия в них и Т-образные пазы вырезают по копиру газорезательными аппаратами из стальных листов Ст. 3 толщиной 30—40 мм.

Диски могут быть цельными или состоящими из двух половин, сваренных между собой. Пакеты остова собирают также и из полу-дисков меньшей толщины, не сваренных между собой. В этом случае, чтобы получить наибольшее возможное сечение на разрыв,

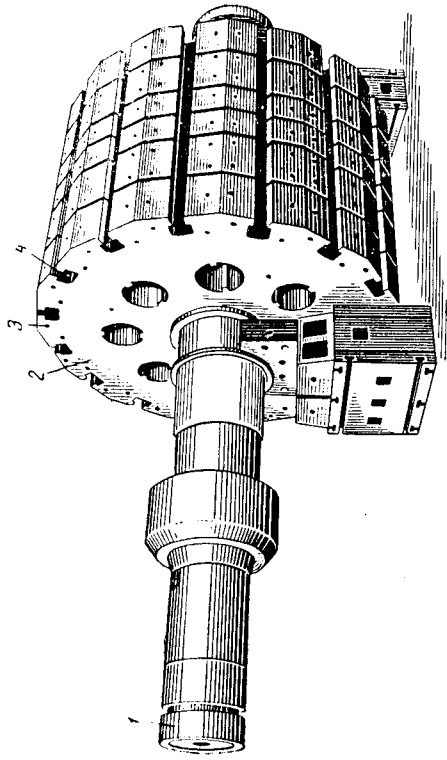


Рис. 1-12. Дискостов (обод) ротора быстрого гид-рогенератора, насаженный непосредственно на вал:

1 — вал; 2 — диск остова; 3 — электрозащелка; 4 — Т-образный паз

при сборке ротора место стыка полудисков при укладывании каж-дого следующего слоя смещается на минимально возможное число полюсных делений. Число делений, на которое смещается полудиск, зависит от числа тех осевых вентиляционных каналов, которые имеются в диске. Необходимо, чтобы при каждом из смещений полудисков все отверстия следующего слоя дисков находились против отверстий предыдущего слоя. Собранные в пакеты диски соединяют стяжками шпильками, проходящими через отверстия в пакетах, либо при помощи пробочных электросварочных швов или электрических заклепок. Далее в пакетах обрабатывают центральные отверстия для посадки на вал и производят долбле-ние шпоночных пазов.

Пакеты имеют ступенчатую посадку на вал и образуют между собой радиальные вентиляционные каналы, подача воздуха к кото-рым обеспечивается из аксиальных отверстий, имеющихся в па-кетах.

Радиальные вентиляционные каналы между пакетами образуются путем приварки к крайним дискам пакета радиально расположен-

ных распорок, имеющих часто двутавровое или корытообразное сечение. При стяжке пакетов шпильками распор между пакетами может быть также образован гайками шпильки, расположенных по концентрическим окружностям, как показано на рис. 1-13. После затяжки и приварки гаек 1 торцовую часть гаек внутрен-него ряда обрабатывают так, чтобы образовался замок, пока-занный на рис. 1-13. Обработанный с торца внешний ряд шпи-лек с гайками 2 служит только для упора. Для каждого пакета,

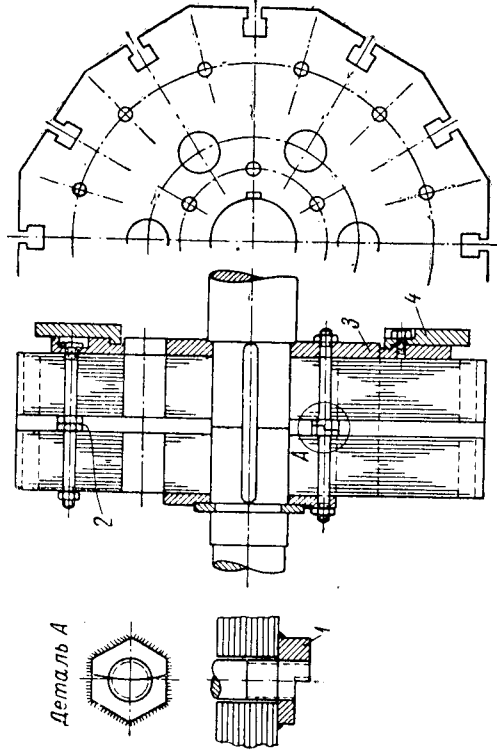


Рис. 1-13. Дискостов (обод) со ступенчатой обработкой гаек стяжных шпилек

насаживаемого на вал, выбирают разные в ступенчатой после-довательности посадочные диаметры, причем наибольший диаметр посадки берут для диска, который первым насаживают на вал. Посадка на вал горячая. Прессовая посадка на вал отдельных пакетов с уменьшающимися диаметрами осевых отверстий значи-тельно облегчает эту операцию, так как для первого пакета посадоч-ной поверхностью вала будет являться поверхность только его крайней последней ступени, для второго — предпоследней сту-пени и т. д.

Тормозные сегменты 4 в вертикальных гидрогенераторах при-крепляются к утолщенному нижнему диску 3.

После сборки сердечника остова ротора окончательно обраба-тывают его грани и Т-образные пазы (для крепления полюсов) на фрезерной колонке.

Описанную конструкцию остова ротора применяют в мощных быстроходных гидрогенераторах. В гидрогенераторах небольшой и малой мощностей дисковые ободы роторов собирают из более тон-ких листов стали. В этой конструкции остов является одновременно

и ободом ротора, на котором крепят полюсы при помощи хвостов Т-образной формы или формы ласточкина хвоста.

Другая конструкция ротора с дисковым остовом предусматривает наличие обода ротора как отдельной части машины. Обод выпол-

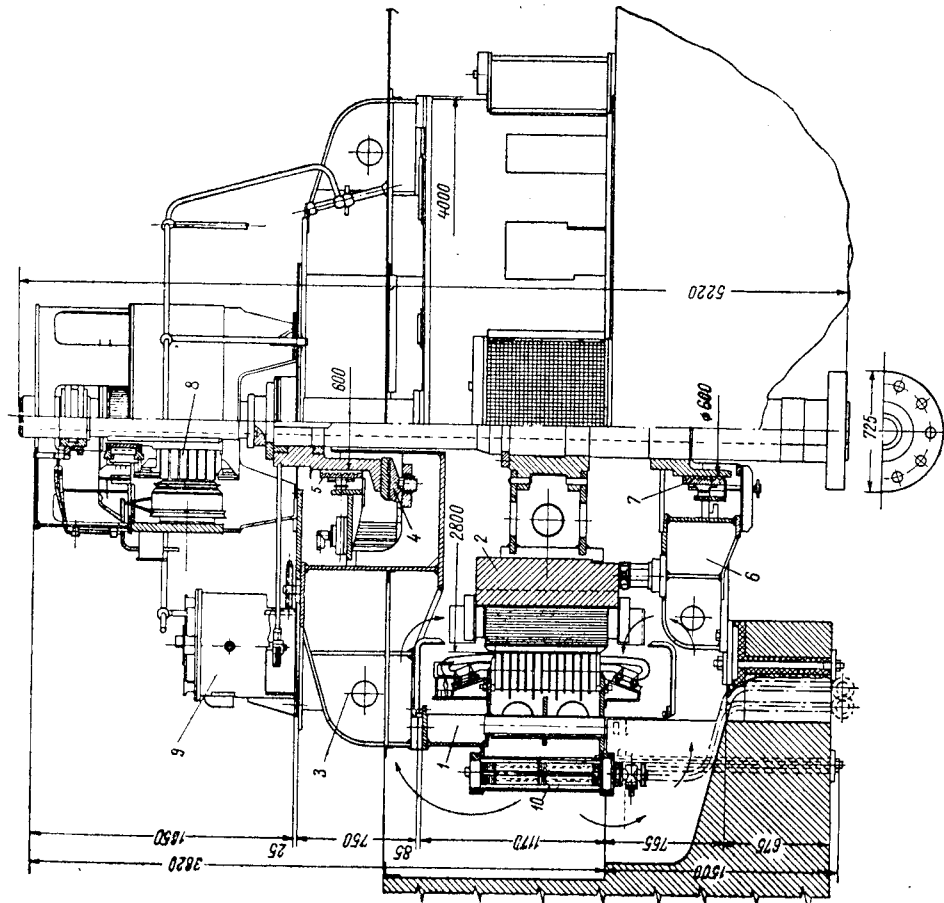


Рис. 1-14. Подвесной гидрогенератор с дисковым остовом и массивным ободом ротора:

1 — статор; 2 — ротор; 3 — верхняя крестовина; 4 — подпятник; 5 — верхний направляющий подшипник; 6 — нижняя крестовина; 7 — нижний направляющий подшипник; 8 — возбудитель; 9 — регуляторный генератор; 10 — воздухоохладитель

няют стальным литым (рис. 1-14) в генераторах относительно небольшой мощности или сегментным шихтованным в более крупных генераторах.

Если диаметр остова ротора меньше 4 м, т. е. он находится в пределах железнодорожного габарита, то более простой в технологи-

ческом отношении получается конструкция неразборного дискового остова, изображенного на рис. 1-15. Остов в этом случае получается в виде барабана с центральной втулкой 3, к которой приварены диски 2 и 1 из стали Ст. 3. По внешней окружности дисков

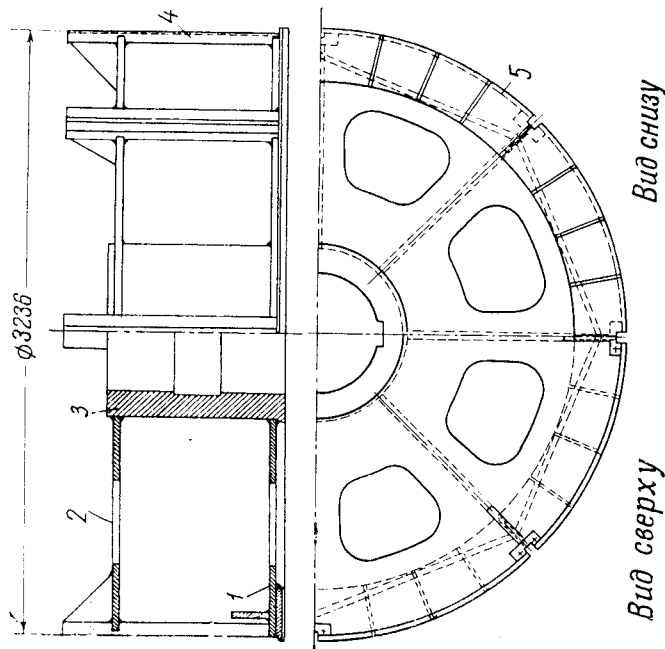


Рис. 1-15. Дисковый неразъемный остов ротора

сварены брусья 4, несущие на себе сегментный шихтованный обод. Тормозные сегменты 5 приваривают к диску 1 наглухо. Крепление полюсов к сегментному ободу осуществляют при помощи Т-образных хвостов. Если обод выполнен литым, то полюсы можно крепить болтами.

Роторы со спицевым остовом

Спицевые остовы роторов бывают двух разновидностей:

1) спицы крепят к дискам остова, которые соединяют с втулкой (рис. 1-16);

2) спицы сопрягают с центральной частью остова при помощи стыковых плит (рис. 1-17).

Рассмотрим конструкцию спицевого остова, изображенного на рис. 1-16. Центральную часть ротора образует насаживаемая на вал стальная втулка 1, являющаяся в больших гидрогенераторах второй после вала крупногабаритной деталью ротора, имеющей большой объем механической обработки. Втулку изготовляют путем

литья на сталелитейном заводе. Изготовление отливки для втулки весом до 80 т в крупных гидрогенераторах представляет значительные трудности. Поэтому в целях придания втулке большей технологичности на заводе «Электросила» спроектирована и изготовлена для волгоградского гидрогенератора вместо литой втулки

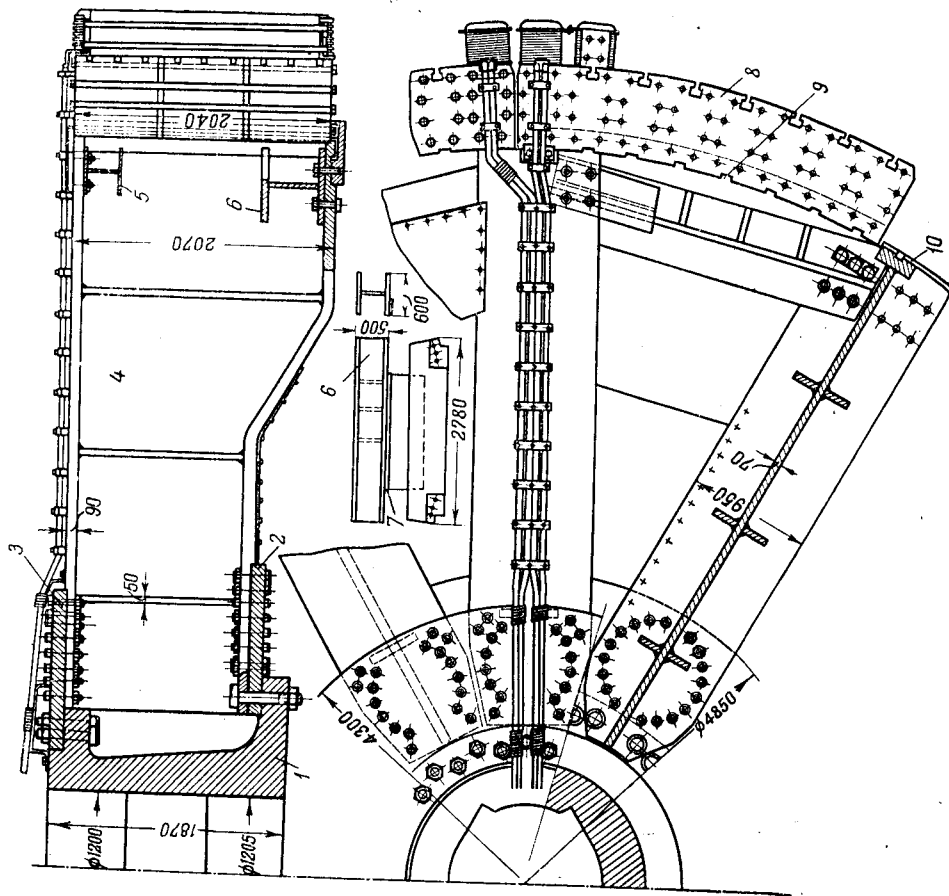
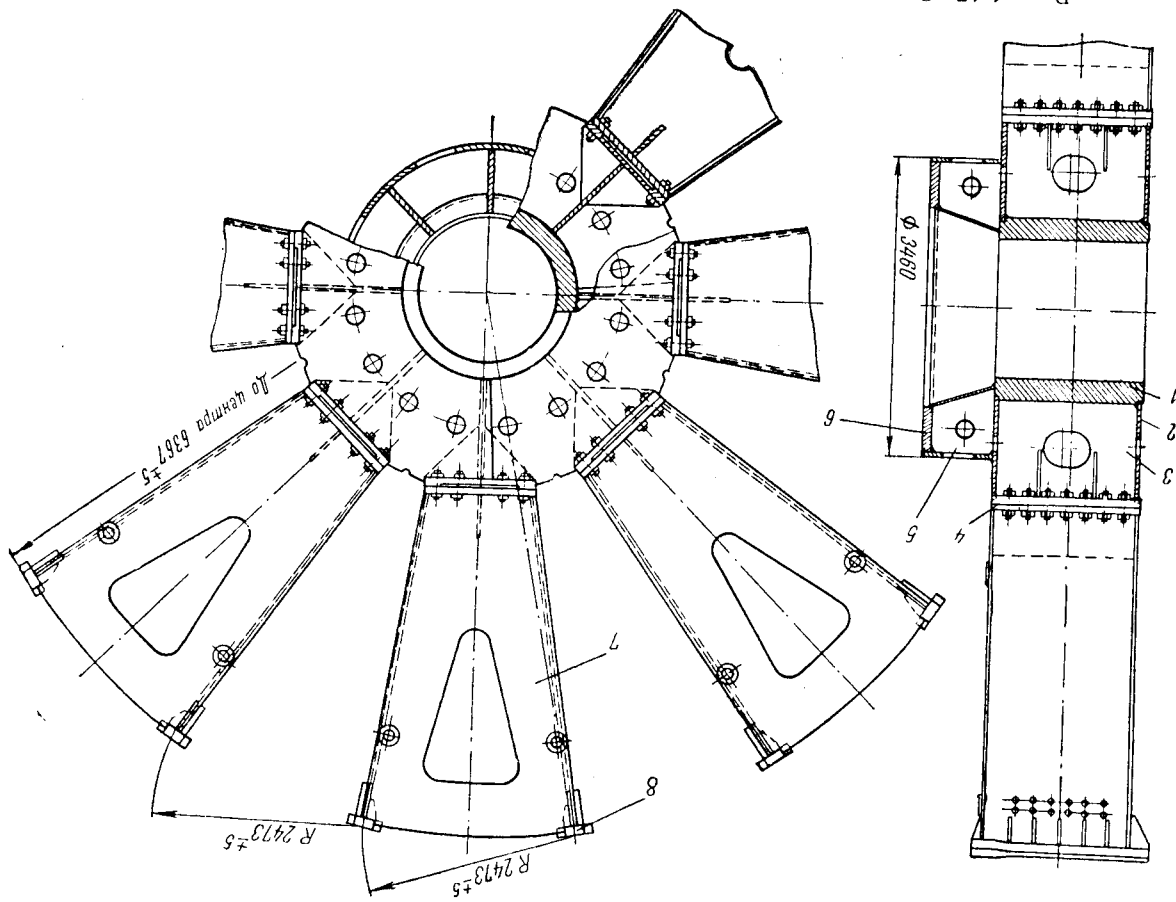


Рис. 1-16. Сплицевый остов ротора с шихтованным сегментным ободом:
 1 — втулка; 2 и 3 — конические шпильки; 4 — спица ротора; 5—6 — балочки жесткости; 7 — накладки; 8 — сегмент обода; 9 — шпоночный паз сегмента; 10 — буртик

втулка сварно-литой конструкции тех же габаритов. Такую втулку сваривают из отдельных частей, выполненных путем отливки с последующей механической обработкой.

К кольцевым фланцам втулки крепят коническими шпильками конусностью 1 : 200 диски 2 и 3. Материалом для дисков служит

Рис. 1-17. Остов ротора со спицами, сопрягаемыми с центральной частью стыковыми плитами



прокатная толстолистовая сталь Ст. 3. Вырезанные из листа два полудиска (в крупных гидрогенераторах) сваривают в стык при помощи автомата ванно-шлаковой сварки и для снятия напряжений отжигают, после чего диски подвергают механической обработке. Коническими шпильками той же конусности 1:200 к дискам прикрепляют спицы ротора 4. Число спиц выбирают в зависимости

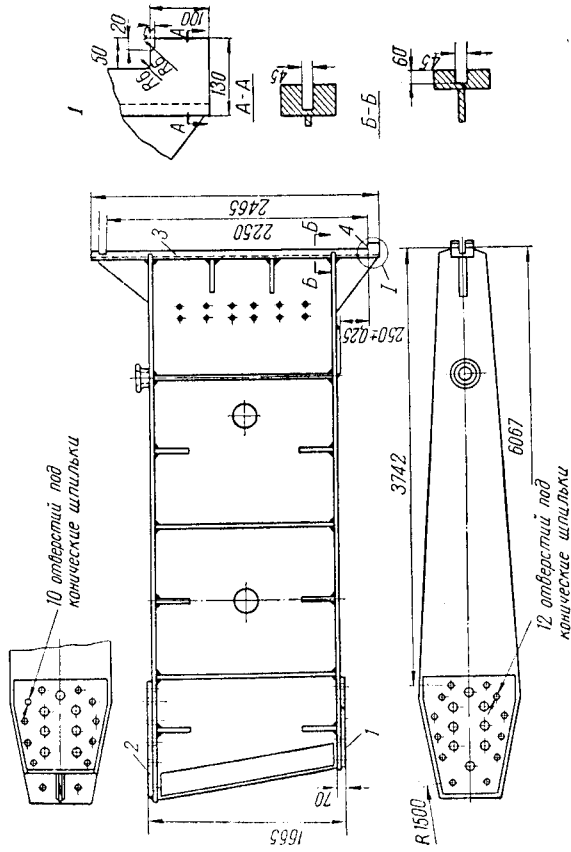


Рис. 1-18. Спица ротора

от числа полюсов и числа сегментов листовой стали, из которых собирают обод ротора. Спицы выполняют чаще всего сварными. Заготовки для спиц вырезают из толстолистовой стали Ст. 3 и отжигают после сварки.

Сварная конструкция спицы ротора крупного гидрогенератора показана на рис. 1-18. К верхней и нижней полкам спицы у внутреннего ее конца приваривают две накладки 1 и 2, опорные поверхности которых, сопрягаемые с верхним и нижним дисками ротора, строго параллельны и обработаны с соблюдением допуска между ними. К внешнему концу спицы приваривают клиновидный брус 3, обработанный вертикальной поверхностью которого должна быть перпендикулярна к опорным поверхностям накладок 1 и 2 полком спицы. Нижняя часть клинового бруса 3 заканчивается буртиком (зубом) 4, имеющим горизонтальную опорную поверхность, на которую опирается нижний кольцевой слой сегментов обода ротора. В верхней части клинового бруса имеется горизонтальный паз, в который закладывается шпонка, предотвращающая скольжение обода ротора относительно остова при его подъеме на тормозах-

домкратах. В вертикальные пазы клиновых брусьев спиц закладывают клиновые шпонки для расклиновки обода ротора.

В генераторах небольшой мощности и габаритов со спицевым остовом ротора спицы выполняют из проката двутаврового сечения. В роторах больших диаметров между спицами вблизи обода могут быть установлены балочки 5 и 6 (рис. 1-16), которые придану дополнителную жесткость спицам ротора. Нижние балочки 5 выбирают более жесткими, так как к ним крепят тормозные сегменты ротора. Для создания упора под тормозные сегменты на нижних балочках приваривают специальные накладные балочки 7, которые образуют заплечико со спицами.

Разновидностью спицевой конструкции остова является остов, в котором спицы крепят не ко втулке, насаживаемой на вал, а к двум параллельным фланцам, откованным заодно с валом. В этом случае ротор не имеет втулки. Спицы крепят к фланцам коническими шпильками.

В описанных, применяемых в гидрогенераторах конструкциях роторов со спицевыми остовами существует только тангенциальная связь между спицами и ободом ротора. В радиальном направлении связь отсутствует. Благодаря этому в обод ротора возникают только растягивающие напряжения. Напряжения изгиба, присущие роторам со спицами, радиально связанными с ободом, здесь отсутствуют, что является большим преимуществом роторов со свободными ободами. Недостатком таких роторов является то, что высокие растягивающие напряжения при угонной скорости вращения, обусловленные центробежными силами, вызывают значительную деформацию обода, достигающую нескольких миллиметров на диаметр. В результате такой деформации обода ротора может произойти смещение центра тяжести ротора, что приведет к недопустимой вибрации гидрогенератора. Чтобы избежать этого, обод насаживают на остов горячей прессовой посадкой. Обод разогревают до температуры 80—100° С и расклинивают по торцам спиц массивными клиньями. Получаемый при остывании обода натяг выбирают равным тому зазору, который мог бы получиться вследствие деформации обода при вращении ротора с угонной скоростью, если расклиновку обода производить в холодном состоянии.

В мощных крупных гидрогенераторах при спицевой конструкции остова ротора ограничивается усилие натяга, развиваемое при горячей расклиновки обода ротора, так как это усилие со спицы передается на конические шпильки, крепящие спицы к втулке, и в них могут возникнуть опасные напряжения.

Конструкция сопряжений роторной звезды с валом, обеспечивающая достаточный первоначальный натяг обода ротора в мощных гидрогенераторах, изображена на рис. 1-17. Эта конструкция впервые применена в гидрогенераторах Братской и Воткинской ГЭС. В новой конструкции остова ротора отсутствует втулка сложной конфигурации с большим объемом механической обработки. Цен-

тральная сварная часть остова предельно больших размеров, доступных для транспортирования, состоит из литой втулки 1 простейшей конфигурации, двух дисков 2 (верхнего и нижнего), насаженных на выточки втулки, вертикальных стенок 3, ребер 5 и нижнего фланца 6, к которому крепят диск подпятника.

Сдвоенные спицы 7, несущие по два клиновых бруса 8, соединены с центральной частью остова при помощи стыковых плит 4, воспринимающих на себя усилия при горячем расклинивании обода ротора.

Трапецеидальная форма спиц остова с широкой стороной трапеции, обращенной к ободу, с двумя вертикальными стенками, имеющими примерно радиальное направление, позволяет получить максимальный момент сечения спицы при минимальном весе и хорошо приспособлена для передачи вращающего момента, момента от веса обода и полюсов. Конструкция остова целиком сварная из листовых стали, что удешевляет ее по сравнению со старыми конструкциями, в которых применялись массивные стальные литые втулки.

§ 1-8. ОБОД РОТОРА

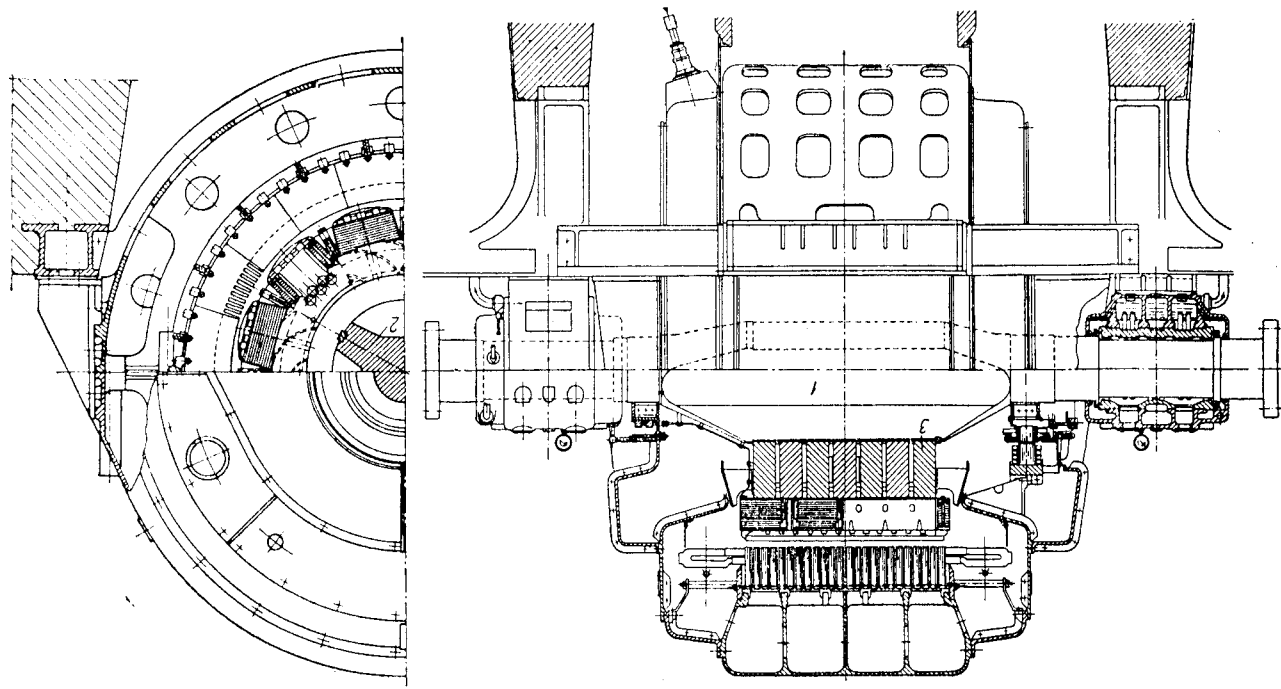
В зависимости от размеров и быстроходности гидрогенераторов ободы роторов выполняют литыми, дисковыми и сегментными. Литые и дисковые ободы применяют в машинах небольшой мощности или в машинах средней и большой мощности высокой быстроходности.

Массивные ободы роторов обычно применяют для гидрогенераторов небольшой мощности (до нескольких тысяч *кВа*) (рис. 1-14). Известны случаи построения быстроходных гидрогенераторов большой мощности с массивным ободом (рис. 1-19). Обод выполнен из колец 3 высококоротной кованой стали, напрессованных на вал 1, имеющий три выфрезерованных ребра 2. Посадку колец на ребра производят с таким натягом, чтобы обеспечить плотность посадки при угонной скорости вращения. В этих роторах применяют полюсы с особым креплением (рис. 1-25).

В больших гидрогенераторах с диаметрами роторов свыше 4 м применяют сегментные шихтованные ободы роторов. Сегменты (рис. 1-20) изготавливают методом холодной штамповки из стали Ст. 3. Если при заданном маховом моменте требуется получить наименьшие радиальные размеры и вес обода ротора при допустимых механических напряжениях в обode при угонной скорости, то применяют сталь повышенной прочности марки Ст. 35.

Так, например, для получения заданного махового момента гидрогенератора для Братской ГЭС вес обода ротора должен быть равен 400 т. При применении для обода стали марки Ст. 3, исходя из допустимых механических напряжений при угонной скорости, радиальный размер обода выбран 1200 мм при весе обода около 700 т. Применяя для обода сталь марки Ст. 35, имеющую допусти-

Рис. 1-19. Быстроходный гидрогенератор на 37500 *кВа*, 500 *об/мин* с массивным ротором.



мос напряжение на 30% больше, чем у стали Ст. 3, вес обода ротора снижен до 470 т при его ширине около 840 мм.

Сборку обода ротора производят непосредственно на месте монтажа гидрогенератора, на достаточно прочной монтажной площадке

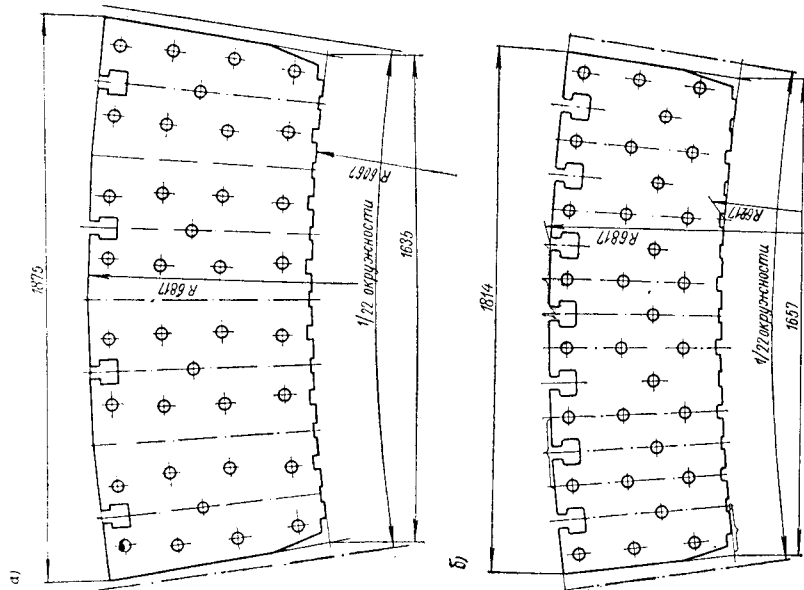


Рис. 1-20. Сегменты обода ротора:
а) — расстояние между пазами равно полюсному делению; б) — расстояние между пазами равно половине полюсного деления

(рис. 1-21), которая воспринимает всю нагрузку от веса собранного ротора с полюсами. Размеры монтажной площадки превышают диаметр ротора на 1,5—2 м.

Размеры шахты в центре монтажной площадки позволяют проходить фланцу вала гидрогенератора и закреплять его в вертикальном положении на монтажной плите, лежащей на дне шахты.

Глубина шахты такая, что после закрепления фланца вала в шахте расстояние от пола до первого пакета обода ротора равно 600—800 мм.

Поверхности сегментов обода ротора перед сборкой тщательно очищают от антикоррозийного масляного покрытия, наложенного на них перед отправкой с завода, а также от следов коррозии и заусенцев.

Вследствие неодинаковой толщины проката листов стали, из которых штампуют сегменты, веса сегментов оказываются различными. При сборке обода ротора может оказаться, что тяжелые сегменты находятся на одной стороне обода, а более легкие — на другой. Это приводит к большому небалансу ротора. Во избежание этого, очищенные сегменты взвешивают и распределяют по группам одинакового веса так, что сегменты одной группы не различаются по весу более чем на 0,5 кг.

В процессе сборки строго следят за равномерным распределением сегментов различного веса по окружности обода.

Сборку сегментов ведут вперекрой стыков, т. е. с нормальным сдвигом одного слоя сегментов по отношению к другому на одно полюсное деление. Конструкция сегмента показана на рис. 1-20, а. При такой сборке из каждых четырех слоев сегментов на растяжение работают только три слоя. Если же выбрать конструкцию сегмента, изображенную на рис. 1-20, б, в котором пазы отстоят друг от друга на половину полюсного деления, и производить сборку обода со сдвигом одного слоя по отношению к другому на половину полюсного деления, то прочность обода повышается, так как из каждых восьми сегментов на растяжение работают семь сегментов.

Применение новой конструкции сегментов (рис. 1-20, б) в волгоградских гидрогенераторах и сборка их со сдвигом на половину полюсного деления позволили уменьшить радиальную длину обода и в результате снизить вес ротора на 100 т. Еще больше прочность обода можно увеличить путем проварки стыков сегментов обода.

Сегменты обода собирают на стяжные шпильки. Не менее трех шпилек на сегмент ставят постоянными, остальные временные, которые заменяют постоянными после сборки и окончательной опрессовки обода.

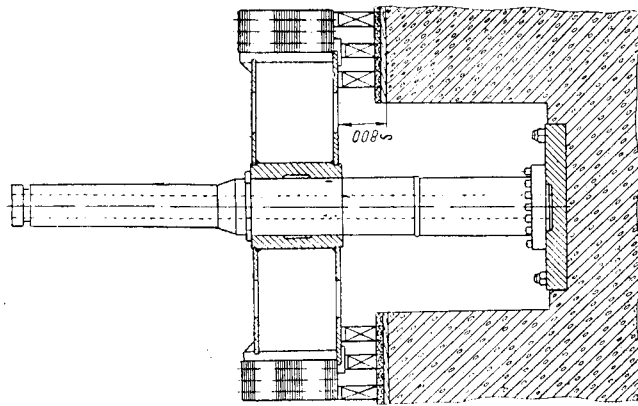


Рис. 1-21. Сборка ротора подвешенного гидрогенератора на монтажной площадке

Переход на клиновом брусе спицы к опорному зубу осуществляют по радиусу, поэтому на первом ряду сегментов обода снимают фаски, соответствующие этому радиусу.

При сборке следят за правильным чередованием укладки сегментов с канавками для пружинок под обмоткой полюсов, а также сегментов с вентиляционными распорками, образующими вентиляционные каналы в обode ротора. По мере сборки обода производят

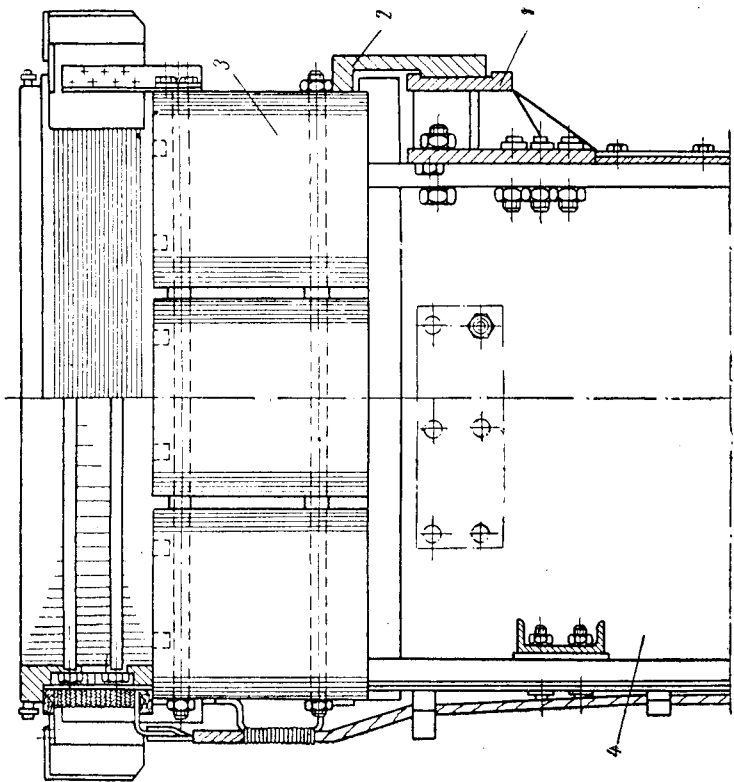


Рис. 1-22. Крепление тормозного сегмента к балкам:
1 — нижняя балка; 2 — тормозной сегмент; 3 — обод ротора; 4 — спица

опрессовку его всеми шпильками равномерно по окружности. Опресовку обода производят каждые 600—700 мм набора пакетов. После сборки всех сегментов обода стягивающие шпильки туго затягивают. Затем заменяют временные шпильки постоянными, производят окончательную стяжку ими всего обода и для предотвращения самоотвинчивания прихватывают сваркой гайки шпилек по одной грани сверху и снизу.

Если штамповку сегментов обода ротора производят комбинированным штампом не за один удар пресса, а попеременно с передвижением заготовки сегмента на одно или два полюсных деления, то

возможна некоторая ошибка в шаге. При укладке таких сегментов может получиться частичный перекрой цилиндрических отверстий и прямоугольных пазов сегментов. Для устранения перекроя отвер-

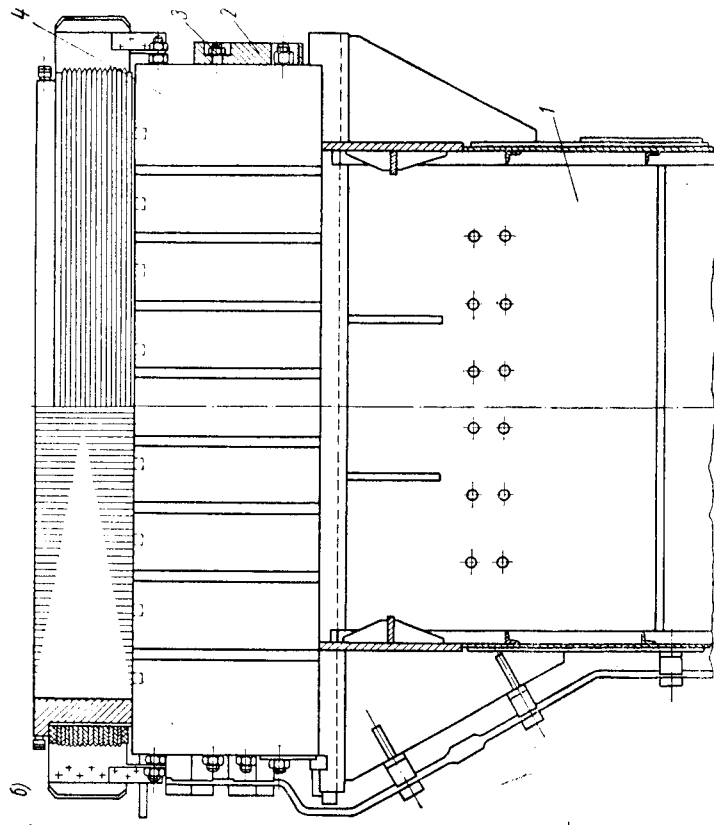
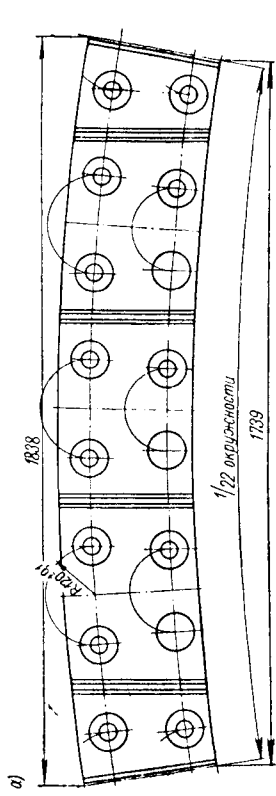


Рис. 1-23. Крепление тормозных сегментов к ободу ротора:
а) — сегмент; б) — конструкция крепления
1 — спица; 2 — тормозной сегмент; 3 — стяжная шпилька; 4 — обод ротора

ствия под стяжные шпильки Т-образные пазы под хвостовики сердечников полюсов и клинья обода прошивают (дорнуют) специальными прошивками (дорнами) после сборки и стяжки сердечника обода ротора.

Собранный и стянутый шпильками обод ротора разогревают либо индукционным способом, либо током обмотки возбуждения до необходимой температуры (80—100°) и расклинивают на клиновых брусьях спиц клиновыми шпонками. При остывании обод получает необходимый натяг.

Для предотвращения скольжения обода ротора относительно остова при подъеме ротора на тормозах-домкратах в верхней части клиновых брусьев имеются горизонтальные пазы, в которые закладываются шпонки. К торцовым частям обода крепят вентиляционные лопатки, обеспечивающие обдув лобовых частей, а также поступление воздуха внутрь машины (в воздушный зазор, в междуполосное пространство).

В нижней части ротора укрепляют тормозные сегменты. В зависимости от конструкции ротора тормозные сегменты размещают либо на нижних подтормозных балках (рис. 1-16 и 1-22) и крепят при помощи болтов, либо непосредственно на шихтованном ободе ротора и крепят их стяжными шпильками, гайки которых утоплены в подрезанных отверстиях сегментов (рис. 1-23).

Для увеличения поверхности охлаждения сегментов и лучшей вентиляции в них предусмотрены радиальные пазы. Поверхность трения сегментов тщательно обрабатывают и шлифуют после установки их на место, т. е. в полностью собранном роторе.

§ 1-9. СЕРДЕЧНИК ПОЛЮСА

Полос ротора гидрогенератора представляет собой стальной сердечник с надетой на него катушкой обмотки возбуждения. Почти все гидрогенераторы (за исключением малой мощности) имеют успокоительную обмотку, размещаемую в наконечниках полюсов.

Сердечник полюса выполняют либо литым с последующей механической обработкой, либо шихтованным из отдельных пластин, стянутых шпильками.

В построенных гидрогенераторах сердечники полюсов, как правило, выполняют шихтованными из отдельных пластин, полученных методом холодной штамповки из листов низкокремнистой или обыкновенной низкоуглеродистой стали толщиной 1—2 мм.

Крепление полюсов к ободу ротора производят либо при помощи болтов (в генераторах небольшой мощности), либо при помощи Т-образных хвостовиков (хвостов) сердечников (рис. 1-24), входящих в соответствующие пазы обода ротора и расклиниваемых длинными полусными клиньями прямоугольного сечения. Каждый полюс крепят двумя парами встречных клиньев, соприкасающиеся грани которых имеют уклон 1 : 200.

В генераторах малой мощности применяют также полюсы, хвосты которых выполнены по форме ласточкина хвоста. В быстроходных генераторах, в которых механические напряжения в хвостах при угонной скорости вращения велики, полюс можно крепить двумя

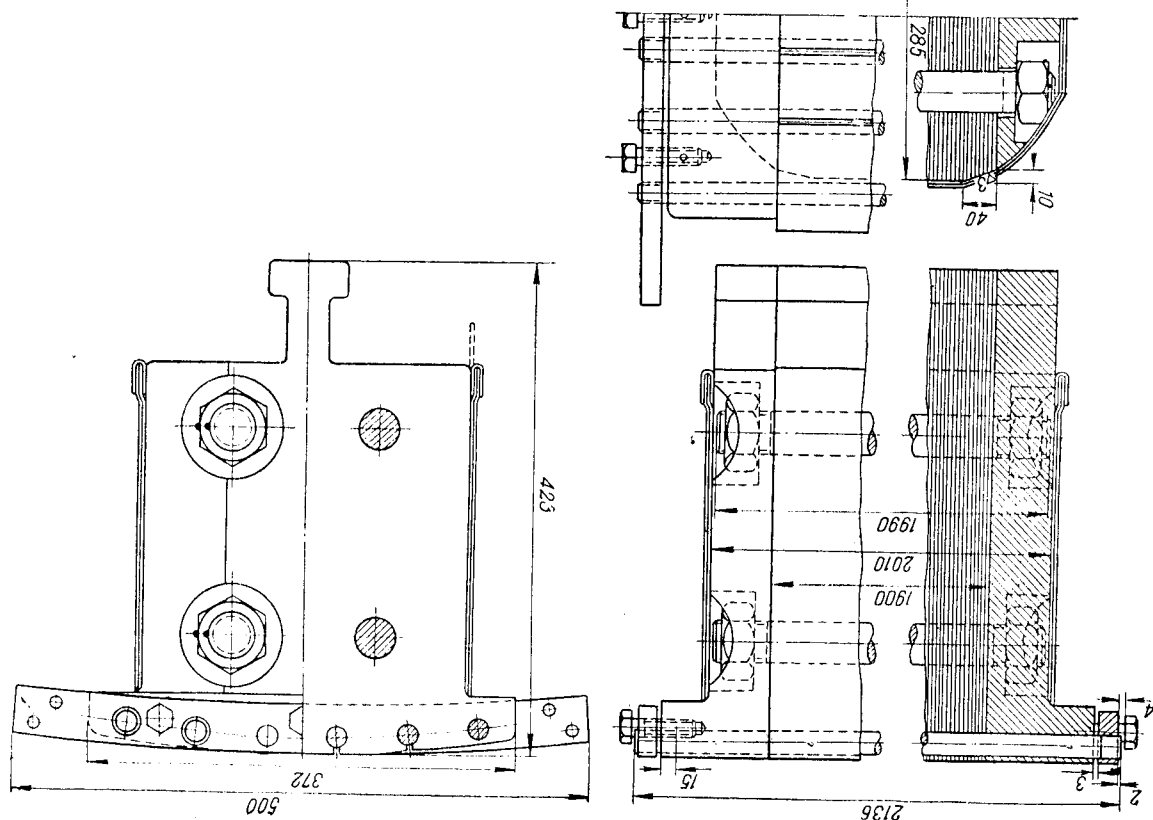


Рис. 1-24. Сердечник полюса со срезами шпильками

хвостами молоткообразной формы. На рис. 1-25 показаны полюсные хвосты повышенной прочности, которые закрепляют клиньями 1

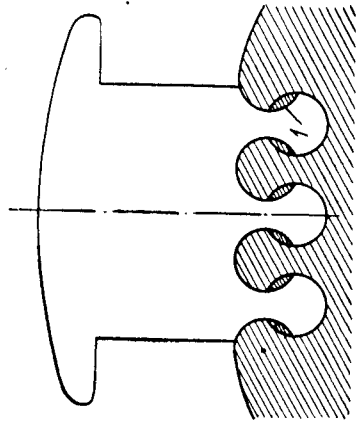


Рис. 1-25. Полюс с хвостами плавно изменяющегося сечения

специального профиля. Такое крепление полюсов производится в гидрогенераторах с очень высокой окружной скоростью. Выплетение этих хвостов требует точной обработки поверхностей соприкосновения и тщательной пригонки шпонок. Концентрация напряжений в самой тонкой части хвоста получается значительно меньшей благодаря плавному изменению сечения хвоста, и поэтому такой хвост при том же сечении выдерживает значительно большие нагрузки, чем Т-образный.

К недостаткам Т-образных хвостов можно отнести большую глубину пазов в ободе ротора, в которых кроме хвоста должны еще размещаться две пары клиньев. Это в значительной степени ослабляет сечение обода, и его приходится выбирать большего радиального размера. Кроме того, применяемые клинья имеют малые сечения и не могут поэтому развивать больших радиальных усилий при расклиновке, а изготовление такого клина при большой длине представляет значительные трудности.

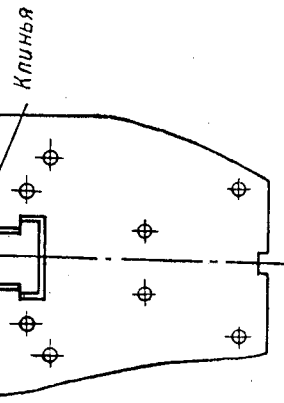


Рис. 1-26. Конструкция крепления полюса с Т-образным хвостом

Эти недостатки отсутствуют в несколько другой конструкции крепления полюса с Т-образным хвостом (рис. 1-26). Клинья в этой конструкции располагаются между ободом и сердечником полюса и могут быть выполнены большего поперечного сечения. Паза под хвосты полюсов имеют минимальную глубину и, следовательно, в меньшей степени ослабляют сечение обода, чем при обычной конструкции.

Штампованные листы полюса собирают на стяжные шпильки в сердечник. По торцам сердечника устанавливаются массивные стальные щеки специального профиля, получаемые путем отливки,ковки

или вырезания из толстых листов с последующей механической обработкой. Материалом для них служит сталь Ст. 35 Л-111 (С = 0,32 ; 0,4%; Mn = 0,5 ÷ 0,8%; Si = 0,17 ÷ 0,37%).

Гайки стяжных шпилек полюса утапливают в специально предусмотренные в щеке выемки (рис. 1-24).

Собранный сердечник полюса для придания ему монолитности опрессовывают с усилием 80—120 кг/см², т. е. значительно больше, чем усилие опрессовки сердечника статора или обода ротора. Опрессованный и стянутый стяжными шпильками сердечник полюса подвергают необходимой механической обработке.

Чтобы боковые ребра четырехгранного сердечника полюса не прорезали изоляцию обмотки, во многих конструкциях сердечников полюсов (рис. 1-24) острые углы сердечника срезают, благодаря чему уменьшаются размеры катушки полюса, надеваемой на сердечник, и создается возможность более удобно расположить ее на сердечнике. Срезание острых углов производят обычно путем фрезерования. Более технологичная конструкция сердечника, не требующая фрезерования углов, представлена на рис. 1-27. Крайние листы сердечника собраны из штампованных листов полюса меньшей ширины, а пространный гетинаксовым клином.

После опрессовки сердечника, как правило, происходит смещение листов друг относительно друга. Появляется ребристость поверхности. Отверстия, выштампованные в наконечниках полюсов для закладки в них стержней успокоительной (демферной) обмотки, уменьшаются. Для облегчения забивания демферных стержней отверстия в листах рассверливают удлиненным сверлом на специальном станке. После рассверливания отверстий в сердечник забивают демферные стержни, устанавливая короткозамыкающие демферные полюсы и паяют их меднофосфористым припоем. Нижние грани хвостовиков сердечников полюсов часто проваривают электродуговой сваркой. Проварка повышает жесткость и прочность хвостовика, благодаря чему представляется возможным увеличить допустимую механическую нагрузку на единицу длины сердечника полюса.

Изолирование сердечников полюсов

Все гидрогенераторы, независимо от нагрева и напряжения, выполняют с изоляцией роторных обмоток класса В, допускающей нагрев полюса и междувитковая изоляция) класса В, допускающей нагрев до 130° С. Это позволяет обеспечить высокую надежность работы ротора, так как ремонт ротора в случае аварии (пробой изоляции) является довольно длительной и трудоемкой операцией. Изоляция роторной обмотки подвергается высоким механическим напряжениям. Одностороннюю толщину изоляции выбирают равной 2,5—4,5 мм. Изоляцию меди катушки от полюса выполняют путем изолирования сердечника полюса.

В крупных гидрогенераторах изолирование сердечника полюса производят следующим образом. На очищенный, промазанный клеем лаком и высушенный сердечник наклеивают полосу полотняной стороной, промазанной клеем лаком к сердечнику и проутюживают горячим утюгом, нагретым до 200—220° С. Далее промазанной стороной накладывают 3—5 слоев асбестовой бумаги и каждый слой утюжат с сильным нажимом. На асбестовую бумагу наклеивают 5—7 слоев микафолия и каждый слой также проутюживают горячим утюгом.

Изолированный таким образом сердечник помещают в обжимное приспособление и закружат на 4—6 час в печь для выпечки при температуре 130—140° С. Для изоляции катушек от сердечников в волжских гидрогенераторах (куйбышевских и волгоградских) применена твердая гильзовая изоляция из асбестокристалла, состоящая из прямолинейных полос для пазовой части и закругленных полос для лобовой части катушки, склеенных между собой клеем БФ2. Изоляция получилась весьма высокопрочной. Себестоимость изоляции снизилась вследствие применения более дешевых материалов и механизации ручного труда.

§ 1-10. КАТУШКИ ПОЛЮСОВ

Полюсные катушки гидрогенераторов выполняют, как правило, из голой шинной меди, намотанной на ребро (исключение могут составлять катушки гидрогенераторов малой мощности). Катушки имеют удлиненную прямую часть и закругленную лобовую часть с одним или двумя радиусами (рис. 1-28). Намотку катушек производят на специальных намоточных станках, у которых оправка имеет вращательное движение для образования закругленной лобовой части катушки и поступательное движение для образования прямой части катушки (рис. 1-29). Для предотвращения образования неровностей (гофра) при загибе на радиусах закругления витка в конструкции станка предусмотрен закрытый с трех сторон прямоугольный ручей, окно которого соответствует сечению меди. Недостатком намотки катушек из меди прямоугольного сечения является появление утолщений меди или напильнов на внутренних закруглениях лобовых частей витков. Эти напильны увеличивают высоту катушек на 10—12% и могут продавить междувитковую изоляцию катушек, что приведет к аварийному витковому замыканию в катушке полюса.

В результате проведенных исследований удалось создать такой технологичный профиль меди, который не дает утолщений витка при намотке меди на ребро. Специальный профиль меди для полюсных катушек волгоградских гидрогенераторов показан на рис. 1-30. Его легко можно получить способом волочения. Как показано на рисунке, специальный профиль отличается от обычного, применявшегося ранее профиля наличием очень небольшого двухсторон-

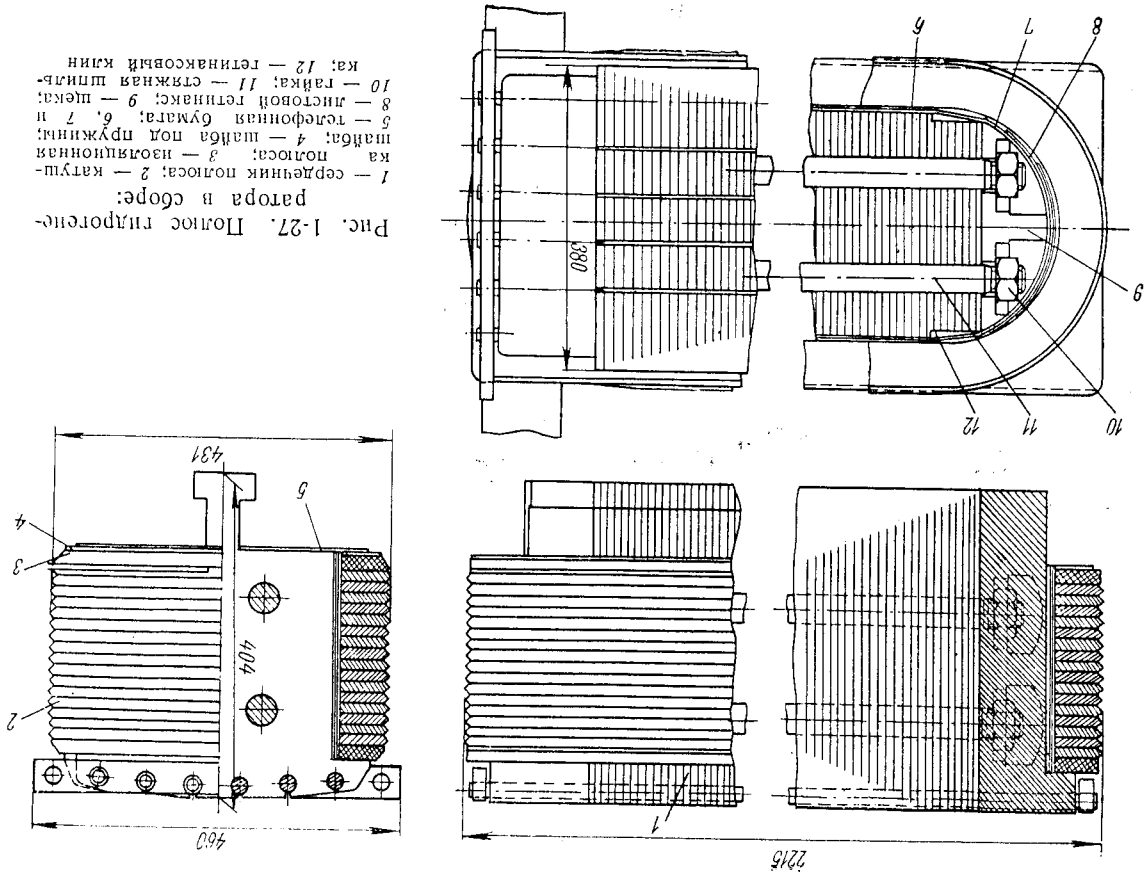


Рис. 1-27. Полюсные гидрогенераторов в сборе:
 1 — сердечник полюса; 2 — катушка; 3 — изоляция под пружинами; 4 — шайба; 5 — телефонная бумага; 6, 7 и 8 — листовая гетинакс; 9 — шпек; 10 — гайка; 11 — стяжная шпилька; 12 — гетинаксовый клин.

него уклона, так что внутренняя сторона меди витка оказывается несколько тоньше внешней стороны. Благодаря этому исключается образование напылов, повышающих толщину меди, и устраняется трудоемкая операция, связанная с их снятием.

На рис. 1-31 показан полюс с катушкой из меди специального профиля. Образующиеся щели на прямолнейных участках катушки

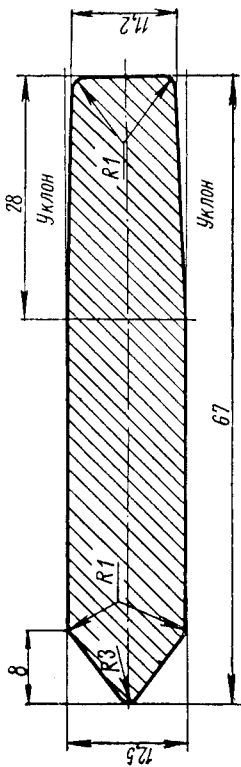


Рис. 1-30. Специальный профиль провода

вследствие двухстороннего уклона заполняют полосками абестовой бумаги, наклеиваемой на обеих сторонах меди, при наложении межвитковой изоляции. Для лучшего охлаждения катушек полосы меди с внешней стороны катушки имеют треугольный профиль. Охлаждаемая поверхность катушек при таком сечении меди увеличивается почти вдвое (рис. 1-27 и 1-31).

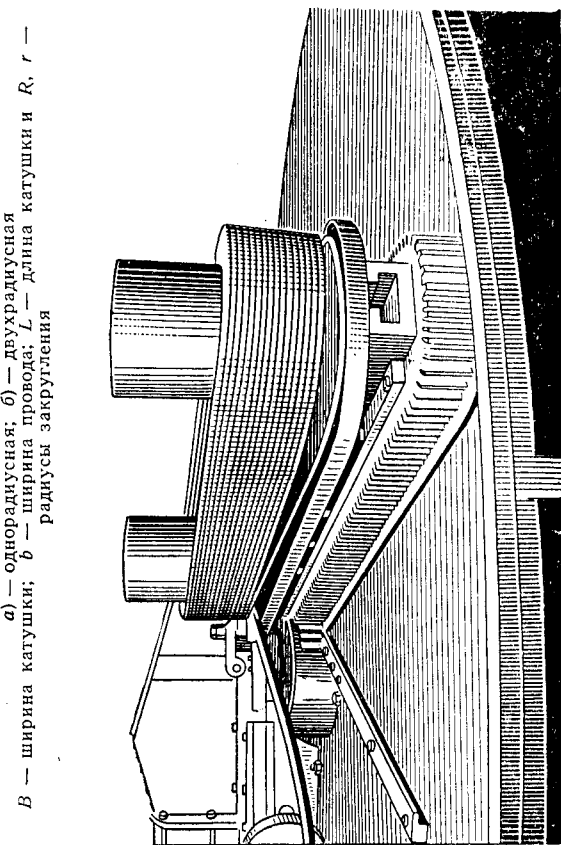


Рис. 1-31. Полюс с катушкой из меди специального профиля

Намотанные на специальном намоточном станке катушки поступают на отжиг в электрические печи для безокислительной термобработки (без доступа воздуха) с последующим охлаждением водой. Необходимость отжига объясняется тем, что медь при намотке приобретает дополнительную жесткость и упругость, вследствие чего витки катушки не занимают правильного положения (не прилегают

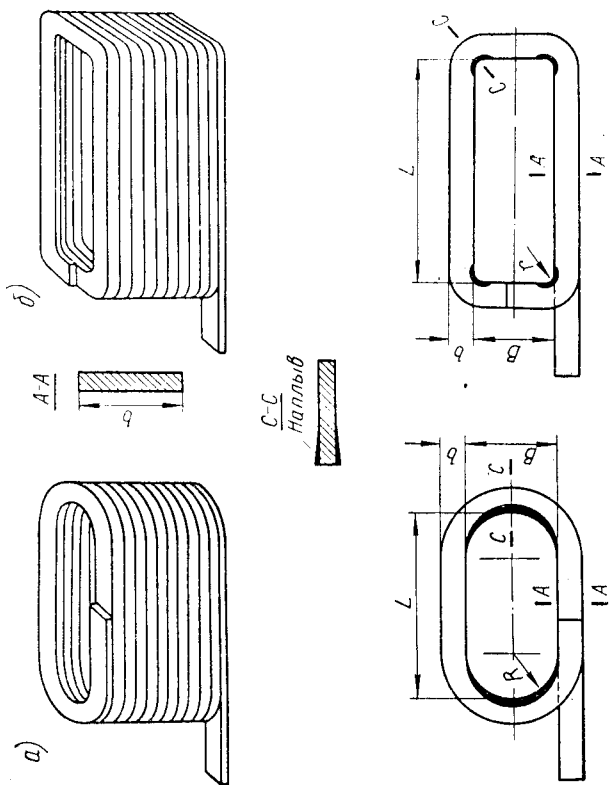


Рис. 1-28. Катушки полюсов:

а) — однорядная; б) — двухрядная
 B — ширина катушки; b — ширина провода; L — длина катушки и R, r — радиусы закругления

Рис. 1-29. Станок для намотки катушек полюсов

плотно друг к другу). Применение для отжига безокислительных печей дает возможность избежать появления окалины, снятие которой является трудоемкой операцией.

После отжига катушку рихтуют в специальных приспособлениях, чтобы были обеспечены предусмотренные по чертежу размеры катушки.

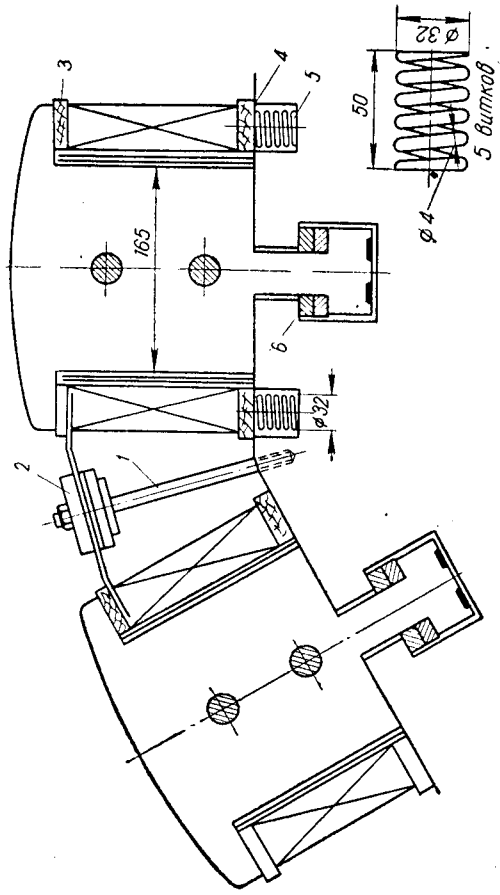


Рис. 1-32. Полуос в собранном виде на ободке

После тщательного осмотра и удаления заусенцев катушку подвешивают на специальных стеллажах, ее витки раздвигают и приклеивают к ним клеящим лаком межвитковую асбестовую изоляцию. Для выравнивания толщины витка на закруглениях каждого витка по внешнему радиусу наклеивают дополнительно асбестовые полоски. При намотке катушек из меди специального профиля на прямолнейные участки витков на скосе к сердечнику наклеивают длинные полоски асбестовой бумаги.

Изолированную и просушенную катушку надевают на оправку и разогревают электрическим током до температуры 160—180° С. Затем отключают ток и формуют катушку на оправке, поджимая ее одновременно с внутренней и наружной сторон. Далее катушку ставят под гидравлический пресс и разогревают током до 160—180° С. При этой температуре катушку выпекают под давлением в течение 45—60 минут.

После очистки катушки от напылов клеящего лака и асбестовой бумаги ее покрывают покровным лаком. В холодном состоянии под прессом катушки испытывают 10-кратным напряжением, после чего они поступают на сборку. Со стороны полюсного наконечника и обода ротора на сердечник полюса надевают по одной изоляционной шайбе 3 (рис. 1-32) из гетинакса или дельта-фанеры толщиной

10—15 мм, так что катушка полюса находится между двумя изоляционными шайбами. Кроме того, со стороны обода надевают еще одну стальную шайбу 4 толщиной 2—3 мм для предохранения нижней изоляционной шайбы от повреждений. Готовый, полностью собранный полюс надевают на ротор и расклинивают клиньями 6.

Перед установкой все полюсы взвешивают и распределяют по весам так, чтобы полюсы одинакового веса были расположены диаметрально противоположно. Таким образом удается избежать значительного небаланса ротора, возможного при несоблюдении этого условия. Для постоянного отжатия катушек от обода ротора к башмаку полюса как при вращении ротора, так и в неподвижном состоянии в обод ротора в специальные канавки под обмоткой полюсов устанавливают пружины 5, которые отжимают катушку (в направлении действия центробежных сил) с силой, превышающей вес катушки в 1,5—2 раза.

После сборки ротора производят пригонку, рихтовку и пайку межполюсных соединений. Катушки всех полюсов соединяют последовательно при помощи пучка тонкой листовой фосфористой бронзы. Таким образом, возможные сдвиги и колебания полюсов не нарушают целостности межполюсных соединений вследствие их эластичности. Межполюсные соединения выполняют двух типов: закреплённые и незакреплённые. Незакреплённые межполюсные соединения применяют в гидрогенераторах с невысокой окружной скоростью ротора и малым расстоянием между полюсными катушками.

В машинах с большой окружной скоростью ротора и значительными расстояниями между полюсными катушками межполюсные соединения делают закреплёнными, как показано на рис. 1-32. Выводные пластины зажимают между изоляционными шайбами 2 и крепят к ободу ротора шпилькой 1.

Короткозамыкающие полюсы услокнительной обмотки каждого полюса соединяют между собой в общее кольцо при помощи эластичных пластин, набранных из тонких медных листов со складкой для компенсации тепловых расширений и механических сдвигов полюсов. Соединительные пластины крепят прочными болтами к концам полюс услокнительной обмотки.

При вращении ротора катушки обмотки возбуждения испытывают действие центробежной силы. Разложим центробежную силу, действующую на медь витка, на составляющие (см. ниже рис. 4-3), одна из которых, направляемая вдоль оси полюса, будет прижимать катушку к полюсному наконечнику, а вторая, ей перпендикулярная, будет стремиться вытянуть виток в межполюсное пространство, создаст выпучивание витков обмотки, называемое боковым распором меди. Для предупреждения бокового распора меди, который может привести к выбрасыванию меди в воздушный зазор и, следовательно, к крупной аварии гидрогенератора, между катушками соседних полюсов устанавливают межполюсные распорки. На рис. 1-33, 1-34 и 1-35 показаны различные конструкции межполюсных распорок.

На рисунках показаны направления сил N бокового давления на распорку.

Необходимость постановки распорок определяют путем расчета напряжений в меди при угонной скорости вращения. В зависимости от значения рассчитанных напряжений, которые получаются тем

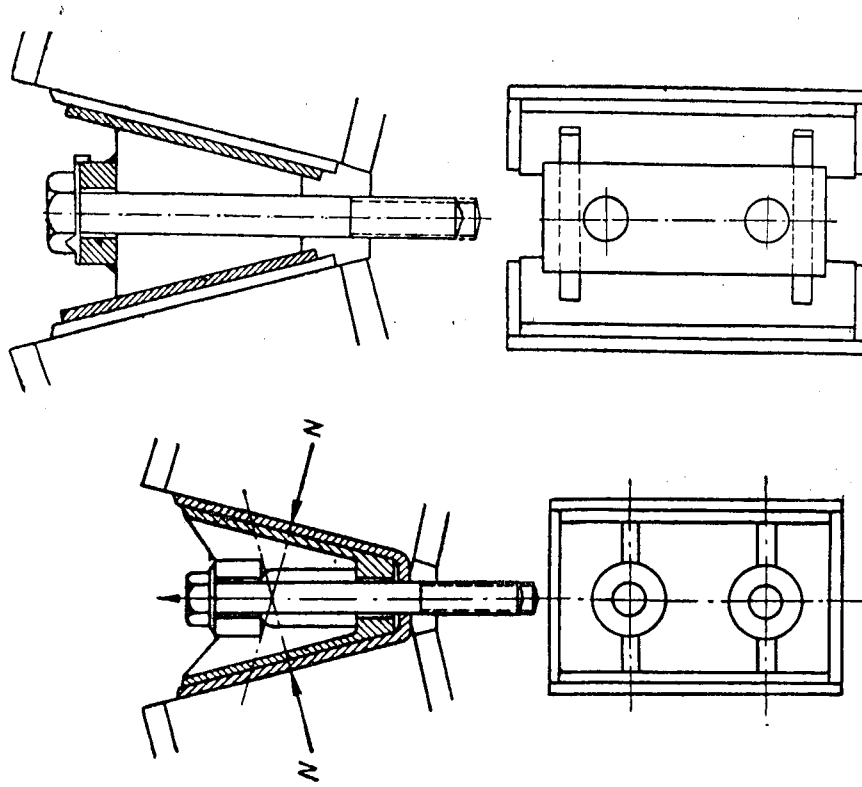


Рис. 1-33. Межполюсная литая распорка, укрепляемая винтами

большими, чем больше скорость и длина машины, межполюсные распорки либо не ставят совсем, либо ставят одну или несколько распорок по длине машины. Крепление распорок в зависимости от конструкции производят по-разному.

На рис. 1-33 и 1-34 показано крепление распорок винтами, притягиваемыми и притягивающими их к ободу ротора. Распорка на рис. 1-33 — литая, рис. 1-34 — сварная.

Если расстояние между боковыми сторонами катушек невелико, а в некоторых случаях катушки сходятся около обода настолько близко, что для болтов нет места, то применяют конструкцию распорки, показанную на рис. 1-35. Распорка удерживается от радиального перемещения при действии на нее сил, возникающих при вращении ротора, кромками наконечников полюсов, в которые упираются ее стенки. Если, в соответствии с электромагнитным расчетом, размеры полюсного наконечника получились такими, что он не выступает за боковую поверхность катушки, то необходимый для распорки выступ можно получить путем изготовления части листов полюса с несколько большей шириной полюсного наконечника. Стенки распорки прижимаются к боковым сторонам катушек винтовыми шпильками 1.

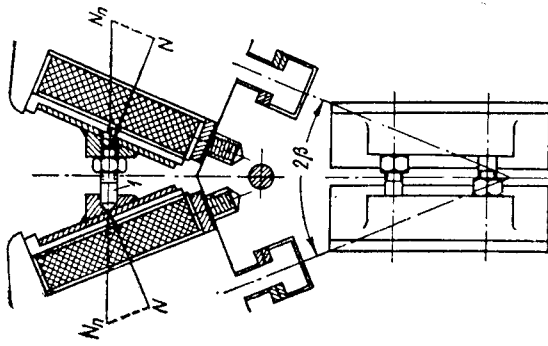


Рис. 1-35. Межполюсная распорка с расклинивающими винтовыми шпильками

В некоторых случаях, при больших окружных скоростях и больших длинах машин применяют комбинированные распорки. Витки катушки, располагаемые ближе к полюсному наконечнику, удерживаются распорками с расклинивающими винтовыми шпильками (рис. 1-35), а витки, расположенные ближе к ободу, удерживаются распорками, притягиваемыми к ободу болтами (рис. 1-33 и 1-34).

Материалом для распорок обычно служит сталь Ст. 3. Но лучше выполнять распорки из немагнитного материала, так как распорки из магнитной стали увеличивают магнитное рассеяние полюсов. Предпочтительным материалом является алюминий или его сплавы. Алюминиевые распорки имеют небольшой вес и поэтому развивают небольшую центробежную силу. При тяжелых стальных распорках центробежная сила, действующая на них, входит существенным слагаемым в те усилия, которые воспринимаются болтами, притягивающими распорки к ободу ротора.

При установке межполюсных распорок следует учитывать, что охлажденные машины и особенно обмотки ротора при наличии распорок заметно ухудшаются.

§ 1-11. ВАЛ

Передача момента вращения от колеса турбины к ротору генератора осуществляется двумя валами: турбинным и генераторным, жестко соединенными между собой фланцевым соединением

при помощи болтов. Кроме крутящего момента вал вертикального гидрогенератора испытывает еще осевые (обычно растягивающие) усилия, являющиеся суммой усилий от веса ротора гидрогенератора, рабочего колеса турбины и осевой составляющей давления воды на рабочее колесо турбины. Таким образом, вал работает одновременно на кручение и на растяжение. Он является одной из ответственных частей гидрогенератора. Материалом для вала служит поковка, изготовляемая на металлургическом заводе по техническим условиям, согласованным между поставщиком и заказчиком.

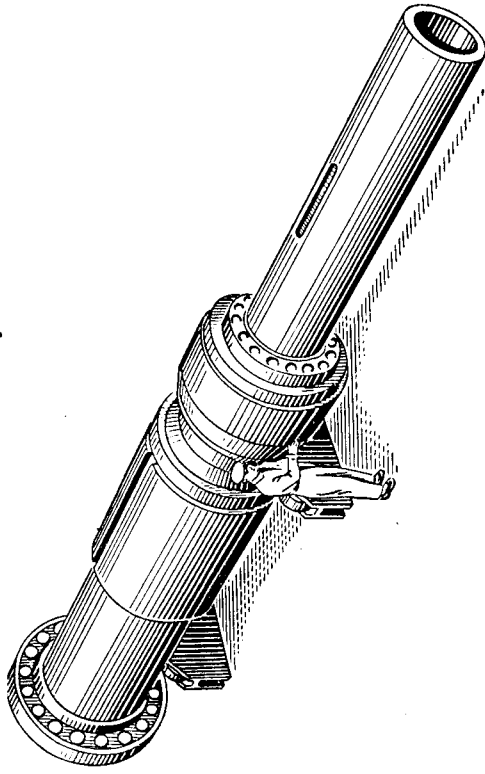


Рис. 1-36. Вал гидрогенератора с прифлансованной надставкой

Покovsky валов изготовляют из стали Ст. 40, имеющей следующий состав в процентах: $C = 0,37 \div 0,44$; $Mn = 0,5 \div 0,8$; $Si = 0,17 \div 0,37$; $Ni \leq 0,25$; $Cr \leq 0,04$; $S \leq 0,04$; $P \leq 0,04\%$.

Для снижения остаточных напряжений и обеспечения необходимых механических свойств поковки подвергают термической обработке по технологии завода-поставщика.

На электромашинностроительный завод поковки валов поставляют в грубо обработанном виде (после обдирки). Покровка вала, как правило, имеет сквозное центральное отверстие, сверленное в прокованной болванке. Такое отверстие необходимо для исследования качества поковки. Наиболее надежным местом поковки являются ее центральные волокна. Наружная часть болванки хорошо уплотняется при проковке. Средняя же центральная часть ее остается сырой, непрокованной. В случае неудовлетворительного качества поковки на поверхности просверленного центрального отверстия легко заметить раковины или неметаллические включения. В эксплуатации центральное отверстие вала часто используют для проведения по нему кабеля токоподвода ротора. В случае, если гидрогенератор приводят во вращение поворотнолопастной гидрав-

лической турбиной, центральное отверстие вала становится необходимым для проведения по нему труб, при помощи которых регулируется поворот лопастей турбины.

Грубообработанную поковку вала подвергают окончательной чистовой обработке на электромашинностроительном заводе. В зависимости от мощности и размеров гидрогенератора вал гидрогенератора может быть цельным или составным. Цельные валы, если

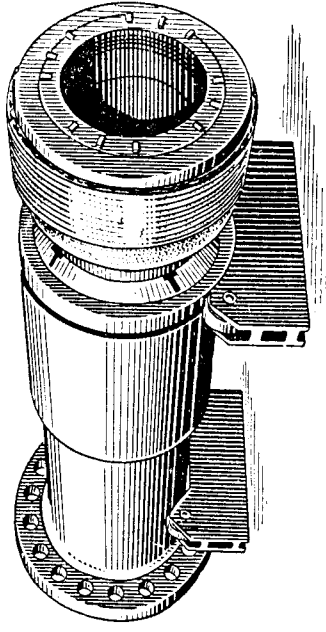


Рис. 1-37. Вал гидрогенератора

они могут быть изготовлены по условиям производства и транспортирования, применяют в гидрогенераторах малой и средней мощности. В крупных гидрогенераторах вал выполняют составным (рис. 1-36), имеющим основной вал (рис. 1-37) и прифланцовываемую к нему в верхней части надставку.

Нижним (левым на рис. 1-37) фланцем вал примыкает к турбинному валу. Ступень в средней части вала предназначена для посадки втулки ротора и обрабатывается с допуском по легкопрессовой посадке. В расточку верхнего (правого) конца вала входит буртик надставки, соединяемой с валом болтами на месте монтажа.

§ 1-12. ПОДПЯТНИК

Подпятник является одним из важнейших конструктивных узлов гидрогенератора. Он воспринимает действующие на вал ротора вертикальные усилия, достигающие в мощных тихоходных гидрогенераторах 3500 т. Конструктивно подпятники гидрогенераторов можно разбить на две группы:

- 1) пружинные подпятники с эластичным поддерживающим диском;
- 2) подпятники с самоустанавливающимися сегментами.

Пружинные подпятники, у которых эластичный поддерживающий диск расположен на пружинной подушке, применялись в гидрогенераторах изготовления 1930—1940 гг. В настоящее время они

не применяются в гидрогенераторостроении, и поэтому конструкция их здесь не приведена*.

Подпятники с самоустанавливающимися сегментами имеют несколько различных конструкций. Основными конструкциями являются подпятники с неподвижными сегментами и подпятники

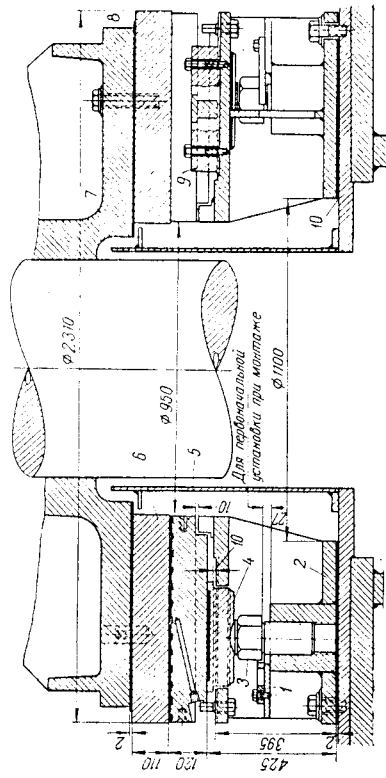


Рис. 1-38. Подпятник с самоустанавливающимися сегментами на винтовой опоре:

- 1 — стопор; 2 — корпус; 3 — болт со сферической головкой; 4 — опорный диск; 5 — сегмент; 6 — диск (зеркало) подпятника; 7 — втулка; 8 — упор; 9, 10 — изоляционные прокладки

с кольцом вращающихся сегментов. Последние не получили в практике большого применения. Практика эксплуатации гидрогенераторов выявила определенные преимущества подпятников с неподвижными сегментами. Поэтому все современные отечественного производства подпятники изготовляют с самоустанавливающимися неподвижными сегментами и гладким вращающимся диском, которые конструктивно можно разделить на следующие подпятники:

- а) с жесткими винтовыми опорами — однорядные и двухрядные;
- б) с гидравлической или рычажной опорой с автоматическим выравниванием сегментов по высоте.

На рис. 1-38 изображен однорядный подпятник с самоустанавливающимися сегментами на жесткой винтовой опоре, рассчитанный на нагрузку 1010 т. Рабочую поверхность сегмента 5 заливают баббитом. Всего по окружности в данном подпятнике десять сегментов. Каждый из сегментов устанавливается на стальном диске (тарелке) 4, который опирается на сферическую поверхность конца болта 3. Стопор 1 предохраняет болт от отворачивания. Для сохранения неизменного положения сегментов друг относительно друга между ними устанавливают упоры 9, имеющие Г-образное поперечное сечение.

* Конструкция пружинных подпятников изложена в книге А. Е. Алесеева «Конструкция электрических машин», ГЭИ, 1958.

Заплевочки упоров препятствуют сегментам подниматься вверх, что возможно при подъеме ротора, если сегменты прилипнут к опорному диску 6. Между корпусом подпятника 2 и дном его масляного бака (ванны) ставят текстолитовую изоляционную прокладку 10 в два слоя вперекрест. Болты, крепящие корпус подпятника к дну бака, также изолируют от корпуса. Опорный диск (зеркало) 1 изолируют от втулки 7, к которой он прикреплен при помощи болтов, текстолитовой прокладкой 8. Электрическая изоляция (10 и 8) нужна в подпятнике для разрыва цепи так называемых подшипниковых токов (см. § 1-14).

Рассмотрим устройство главных элементов подпятника и его работу. Трение в подпятнике возникает на границе раздела неподвижных сегментов и вращающегося диска. Поверхностное трение может быть сухим при непосредственном перемещении диска по сегментам или жидкостным — при наличии жидкостного слоя (масляной пленки) между диском и сегментами.

Сухое трение возникает при наличии шероховатостей трущихся поверхностей, так как абсолютно гладкой поверхности достичь практически невозможно. При значительных удельных давлениях сила трения в подпятнике настолько велика, что значительная часть мощности первичного двигателя (турбины) уходит на ее преодоление. При этом эта мощность выделяется в виде тепла, разогревая поверхность трения. Поэтому длительная работа подпятника при сухом трении недопустима. Для уменьшения силы трения трущиеся поверхности разъединяют жидкостью (маслом) и поверхностное сухое трение заменяют внутренним жидкостным трением, которое во много раз меньше сухого трения. Подпятники рассчитывают на жидкостное трение. В процессе работы подпятника между трущимися поверхностями образуется масляная пленка толщиной 0,04—0,08 мм. Сухое или полусухое трение допускается только временно в момент трогания агрегата.

Непрерывным условием образования жидкостного трения является возможность самоустановки сегментов под некоторым углом к поверхности трения вращающегося диска. Если сегмент закреплен жестко так, что он не сможет образовать клиновидного зазора между баббитовой поверхностью трения и зеркальной поверхностью вращающегося диска, то масляная пленка равномерна по толщине и практически обладает незначительной подъемной силой. Такая пленка не может обеспечить надежного жидкостного трения между трущимися поверхностями.

Так как клинообразная масляная пленка на набегающей кромке сегмента толще, а на сбегавшей кромке тоньше, то нагрузка распределяется по плоскости сегмента неравномерно. В зоне минимальной толщины масляной пленки удельные нагрузки являются максимальными, в зоне максимальной толщины — минимальными. Из-за неравномерности распределения удельных нагрузок по площади сегмента опора сегмента устанавливается не в геометрическом центре

площади сегмента (рис. 1-39), а в центре жидкостного давления. Этим в значительной степени облегчается самоустановка сегмента под некоторым углом к диску подпятника и образование клинообразной масляной пленки.

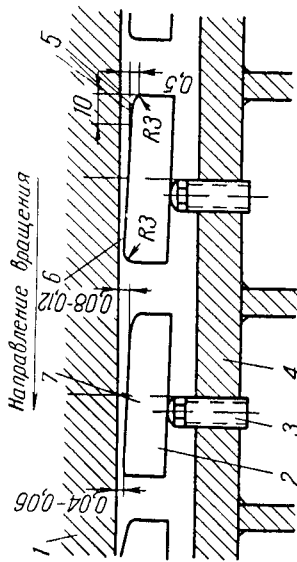


Рис. 1-39. Схема работы подпятника:

1 — вращающийся диск; 2 — сегмент подпятника; 3 — опорный винт; 4 — опорное кольцо; 5 — набегающая кромка; 6 — сбегающая кромка; 7 — середина сегмента

Принципиальная схема работы подпятника показана на рис. 1-39. Жидкостное трение без металлического касания трущихся поверхностей при малой толщине масляной пленки возможно только при обработке поверхностей трения с высокой точностью и точном монтаже подпятника, при котором рабочие поверхности всех сегментов лежат в одной плоскости, а поверхность трения вращающегося

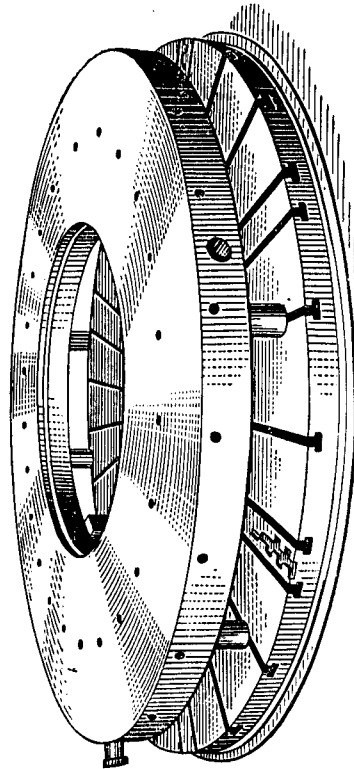


Рис. 1-40. Диск подпятника

диска строго перпендикулярна к оси вращения. Таким образом, надежная работа подпятника определяется главным образом двумя основными деталями — диском и сегментами.

Диск подпятника (рис. 1-40) изготавливают из поковки стали Ст. 45 следующего состава (в процентах): $S = 0,42 \div 0,50$;

$Si = 0,17 \div 0,37$; $Ni \leq 0,25$; $S \leq 0,04$; $P \leq 0,04$. Твердость стали $HB \geq 180$.

На электромашиностроительный завод поковки прибывают с металлургического завода после предварительной токарной обработки и термообработки, обеспечивающей получение требуемых механических свойств при минимальных остаточных напряжениях.

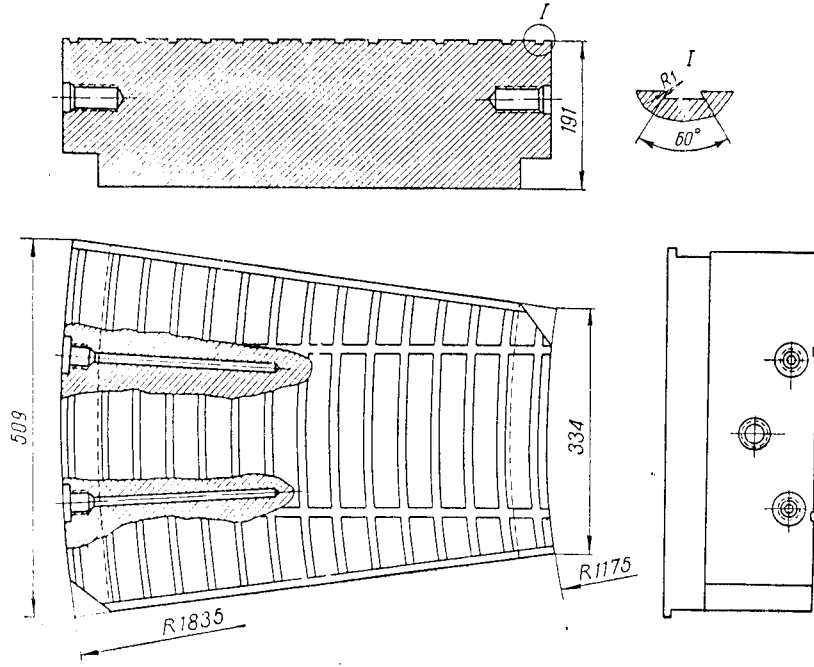


Рис. 1-41. Основание сегмента подпятника

Всю последующую чистовую обработку диска подпятника производят на электромашиностроительном заводе высококвалифицированные рабочие. Обработанный диск подпятника должен иметь чистоту обработки торцовых поверхностей: со стороны прилегания к втулке — по 7 классу, а поверхность трения, называемую зеркалом — по 9 классу. Отклонения от плоскости диска, а также от параллельности его плоскостей не должны превышать 0,03 мм по всей плоскости.

Сегмент подпятника представляет собой стальное основание трапециевидальной формы (рис. 1-41) толщиной до 200 мм,

на которое нанесен слой антифрикционного сплава баббита B83 по ГОСТу 1320—55 (рис. 1-42).

Основания для сегментов получают путем разрезания кольца из толстолистовой стали. Заготовку в целях уменьшения отходов стали можно получить путем сварки из двух полудисков. Отожженный сваркой диск обтачивают и растачивают начисто. Один из его

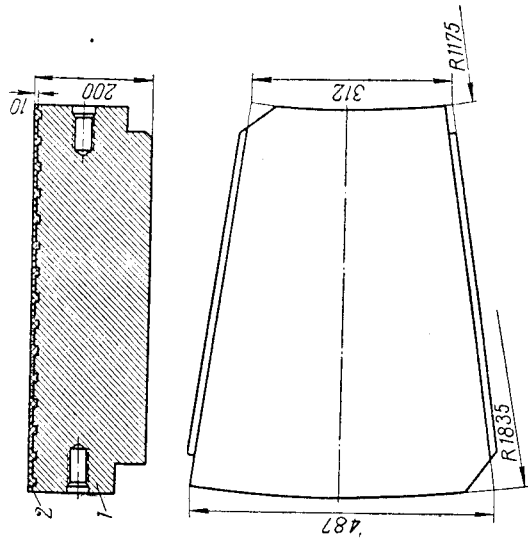


Рис. 1-42. Сегмент подпятника, залитый баббитом и обработанный начисто:

1 — стальное основание сегмента; 2 — баббитовый слой

торцов обрабатывают с оставлением следов реза и на нем растачивают концентрические канавки формы ласточкина хвоста для механического крепления баббитового слоя. Затем диск разрезают на сегменты, обрабатывают по боковым радиальным поверхностям, сверлят и нарезают отверстия для крепления термосопрогивлений (рис. 1-41) и фрезеруют две долевые канавки для дополнительного крепления баббитового слоя против его тангенциальных сдвигов.

Наиболее ответственной операцией при изготовлении сегментов является нанесение баббитового слоя. Баббит наносят на хорошо облуженную поверхность основания сегмента одним из следующих способов:

- 1) статическая заливка расплавленного баббита;
- 2) статическая заливка баббита с последующей опрессовкой на гидравлическом прессе;
- 3) запрессовка в сегмент предварительно отлитой баббитовой пластины;
- 4) статическая заливка баббита на биметаллическое (сталь — медь) основание сегмента (опытные образцы).

Применение медного подслоя повышает эксплуатационные качества узла трения подпятника и обеспечивает значительную экономию в антифрикционном сплаве. После нанесения баббитового слоя сегмент подвергают механической обработке. Контроль сцепления баббита со стальным основанием (или медным подслоем) производят методом ультразвуковой дефектоскопии, которым обнаруживают даже небольшие отслоения баббита.

Сегменты и диск подпятника во время работы находятся в масляной ванне. Масло является не только рабочей жидкостью, создающей жидкостное трение в подпятнике, но и охлаждающей средой. Вся работа, затраченная на преодоление сил трения, превращается в тепло, которое нагревает подпятник и окружающее его масло. Количество выделяемого тепла в подпятнике довольно значительное. Одним из важнейших факторов, определяющих надежную работу подпятника, является интенсивное охлаждение поверхностей трения. Это достигается обильной подачей холодного масла к активным частям подпятника. Для этого в диске подпятника имеются радиальные отверстия с выводом в центральную часть подпятника. Действуя как лопатки центробежного насоса, радиальные отверстия создают циркуляцию масла — холодного к нагревшимся частям подпятника, горячего — к маслоохладителю. Маслоохладитель представляет собой систему лагунных трубок, по которым циркулирует холодная вода. Маслоохладитель выполняют в виде кольца, охватывающего подпятник. Таким образом, тепло, выделяющееся при трении, передается маслу, масло передает его маслоохладителю, от которого оно уносится циркулирующей водой.

В некоторых гидрогенераторах для увеличения циркуляции масла и усиления охлаждения подпятника предусматриваются циркуляционные насосы. При необходимости для уменьшения размеров подпятника сегменты располагают в два ряда. На рис. 1-43 представлена часть подпятника куйбышевского гидрогенератора с двухрядным расположением сегментов.

Количество сегментов во внутреннем и внешнем рядах одинаковое. Балансирная связь между каждой парой, состоящей из сегментов внешнего и внутреннего рядов, автоматически обеспечивает заданное распределение нагрузки между внешним и внутренним рядами сегментов. Наличие винтовых регулируемых опор у сегментов позволяет выравнивать нагрузку между отдельными парами.

Наличие балансира позволяет вести настройку подпятника, регулируя опорные болты только внешнего ряда, что исключает необходимость доступа к внутреннему ряду сегментов, болты которых применяют лишь для предварительного грубого выравнивания положения сегментов и балансира.

Средняя расчетная удельная нагрузка на баббитовую поверхность, при которой работают подпятники с сегментами на жесткой винтовой опоре, не превышает 40 кг/см^2 . В то же время в лабораторных условиях при испытании отдельных плоских сегментов удель-

ные нагрузки увеличивают до $100-150 \text{ кг/см}^2$. При этом целостность масляной пленки сохраняется. Относительно низкие средние удельные нагрузки в подпятниках возникают потому, что практически во время его работы не удается создать условий для равномерного распределения нагрузки по сегментам.

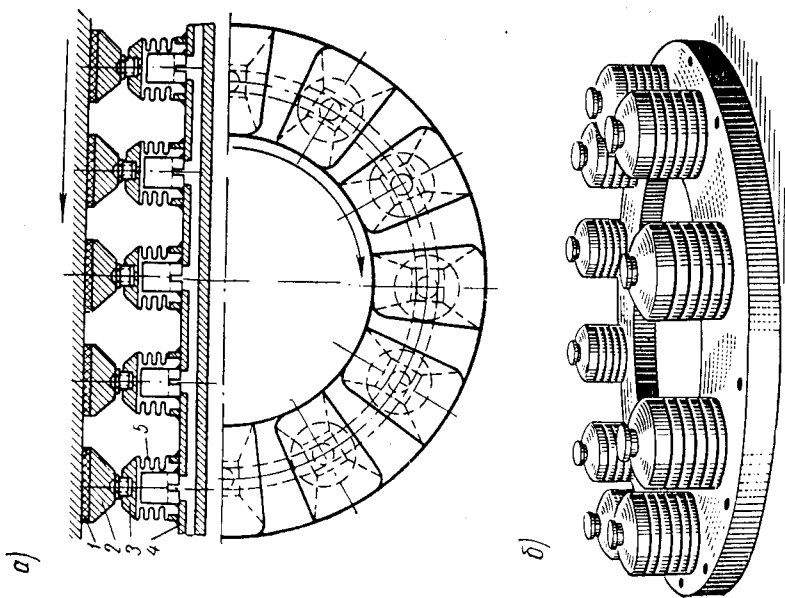
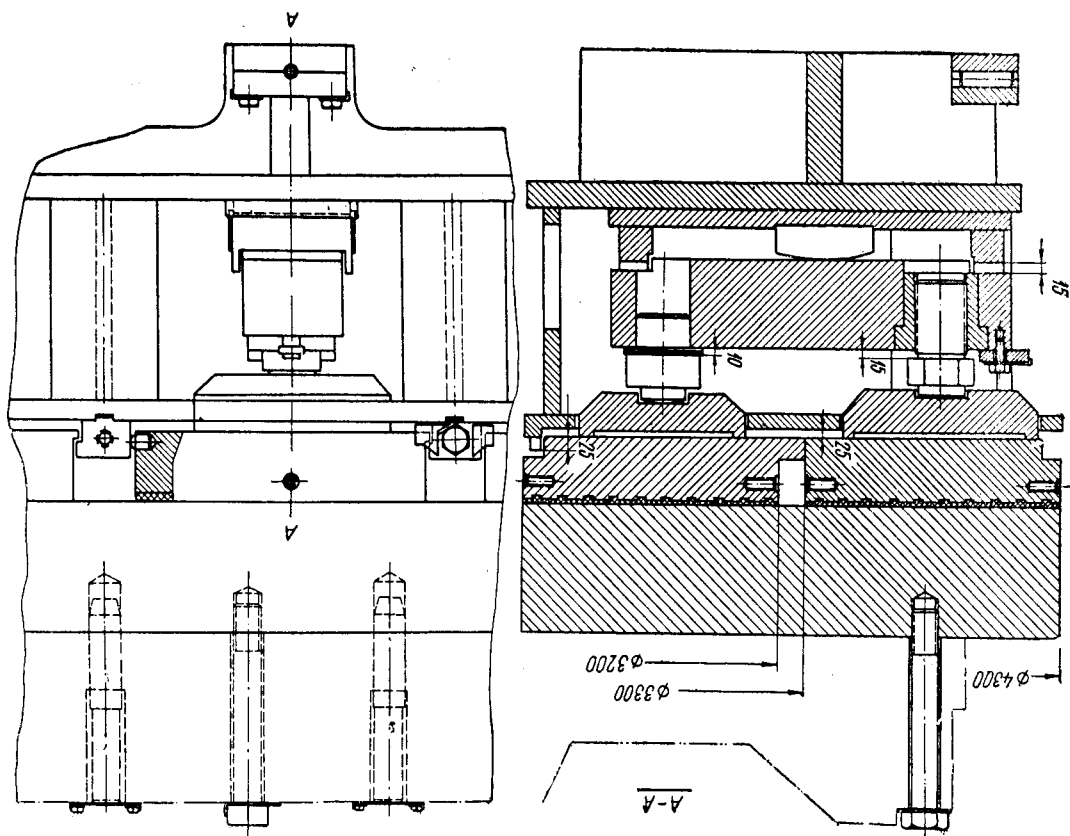


Рис. 1-44. Подпятник на гидравлической опоре:

а) — конструктивная схема подпятника; б) — основание подпятника с приваренными камерами; ← — направление вращения

Инженеры М. Н. Грузов и К. Ф. Костин в 1952 г. предложили, а затем разработали и внедрили конструкцию подпятника на гидравлической опоре, допускающую средние расчетные удельные нагрузки свыше 65 кг/см^2 . Конструкция подпятника показана на рис. 1-44. Подпятник имеет такой же диск, как и у подпятников с сегментами на жесткой винтовой опоре. Опорный винт со сферической головкой ввернут в верхнюю часть 3 стальной эластичной камеры 5, которая представляет собой цилиндр с кольцевыми выточками, чередующимися по высоте цилиндра с внутренней и с внешней стороны. Наличие кольцевых выточек позволяет при сравнительно небольшом осевом усилии вызвать осадку камеры по высоте

Рис. 1-43. Подпятник с двумя рядами расположенных сегментов



и таким образом изменить внутренний объем камер 5. Основание 4 представляет собой кольцо, на верхней части которого имеются цилиндрические глухие углубления, над которыми устанавливаются стальные эластичные камеры, наглухо привариваемые к основанию. Глухие углубления в основании подпятника сообщаются между собой через специальные полости в толще самого основания без каких-либо внешних трубопроводов. Внутренние полости камер и основания подпятника заполнены маслом и сообщаются между собой по принципу сообщающихся сосудов. Масло наливается через отверстия в верхней части камер. Отверстия после заполнения камер маслом закрывают винтовыми пробками и заваривают. В таком положении вся система действует как пружина.

Если создать осадку одной камеры, то все остальные камеры равномерно поднимутся на определенную величину. Камеры выполняются из прочной стали. Собственная упругость камеры такова, что нагрузка на свободную камеру (без масла), равная 20 т, вызывает ее осадку по высоте на 2 мм. Внутри каждой камеры помещен стальной цилиндр, назначение которого уменьшить объем масла, чтобы привести в соответствие объемное увеличение масла и внутренний объем стальной камеры при повышении температуры ванны подпятника в процессе работы генератора. Кроме того, на торцевые плоскости внутренних цилиндров могут опуститься стальные камеры в случае аварийной утечки масла из внутренних полостей камер.

Особенностью такого подпятника является то, что допущенные при сборке отклонения по высоте отдельных сегментов компенсируются высотой камеры вследствие перераспределения масла в камерах. Аксиальный бой вращающегося диска при различных углах поворота вала из-за неперпендикулярности линии вала к плоскости подпятника также компенсируется эластичностью камер подпятника, высотное положение которых изменяется в зависимости от геометрии вращающегося диска, не нарушая равномерности загрузки сегментов. Таким образом, нагрузка на каждый сегмент и толщина масляной пленки практически постоянны при работе подпятника. Это является наиболее ценным качеством подпятника на гидравлической опоре, так как надежность работы подпятника определяется не средние, а максимальные местные удельные нагрузки, которые при чрезмерных превышениях могут явиться источником и очагом аварии.

Кроме обеспечения равномерной загрузки сегментов, большое значение для надежной работы подпятника имеет равномерное распределение удельных нагрузок в пределах площади каждого сегмента, которое можно обеспечить стабильностью рабочей плоскости сегмента, т. е. отсутствием деформации этой плоскости от температуры и нагрузки. В рассматриваемом подпятнике это достигается благодаря введению двух конструктивных мероприятий. Во-первых, толщина сегмента уменьшена до 50 мм по сравнению с 150—200 мм в подпятниках на жесткой винтовой опоре. Это позволяет

снизить перепад температур между поверхностью трения сегмента 1 (рис. 1-44) и его опорной поверхностью и, кроме того, делает сегмент менее жестким, принимающим под нагрузкой плоскость опорной подушки 2. Во-вторых, применена массивная, более жесткая опорная подушка 2 трапециевидной формы (вместо круглой), соответствующей форме сегмента. Таким образом, тонкий сегмент, опираясь на жесткую массивную подушку по всей опорной плоскости, равномерно воспринимает нагрузку всей своей рабочей поверхностью.

§ 1-13. НАПРАВЛЯЮЩИЙ ПОДШИПНИК

Радialные усилия ротора гидрогенератора воспринимают направляющие подшипники, установленные в крестовинах. В гидрогенераторе устанавливаются один или два направляющих подшипника. Установка только одного направляющего подшипника возможна благодаря жесткому фланцевому соединению валов гидрогенератора и турбины. Вторым направляющим подшипником такого составного вала гидроагрегата (гидрогенератора—турбурина) является направляющий подшипник турбины.

Применявшиеся ранее в гидрогенераторах направляющие подшипники со вкладышем, залитым баббитом, цилиндрической формы, имеющим разъем в плоскости оси вала, являлись неудобными как при их эксплуатации, так и при монтаже и демонтаже.

Направляющие подшипники современных гидрогенераторов состоят из комплекта самоустанавливающихся сегментов, удобных при монтаже и технологичных в производстве. Сегментный направляющий подшипник купящегося типа показан на рис. 1-45. Сегменты 3 устанавливаются по высоте между консолями 4. С помощью резьбовой шпильки 6 можно регулировать положение сегмента в радиальном направлении. Так как сегменты самоустанавливаются, обеспечивается надежное жидкостное трение между трущимися поверхностями. Шпилька 6 ввертывается в кольцо 5, сваренное в крестовину гидрогенератора. Внутренний диаметр кольца выбирается таким, что можно производить монтаж и демонтаж подпятника без разборки крестовины. Рабочей поверхностью сегменты опираются на наружную поверхность втулки 2, насаживаемой на вал прессовой посадкой. Сваренное в крестовину кольцо 5 вместе с приболченными к нему баком 4 образуют масляную ванну подшипника. Бак 7 для возможности его сборки выполняют разъемным на две части. Масло заливается на уровень приблизительно $1/3$ высоты трущейся поверхности подшипника. Этого бывает, как правило, достаточно, так как масло, увлекаемое вращением вала, по системе смазочных каналов, устройств в баббите залилке вкладыша, распределяется по всей трущейся поверхности.

В рассматриваемой конструкции направляющего подшипника, изображенной на рис. 1-45, подача смазки к трущейся поверхности

осуществляется благодаря наличию во втулке 2 просверленных ко-
 сых (иногда радиальных) отверстий 1, которые работают как цен-
 тробежный насос. Для того чтобы предупредить вытекание масла
 из масляной ванны подшипника, между отливом втулки 2 и валом
 предусмотрена высокая стенка масляного бака 7. В масляном баке
 помещен маслоохладитель 8, состоящий из медных или латунных

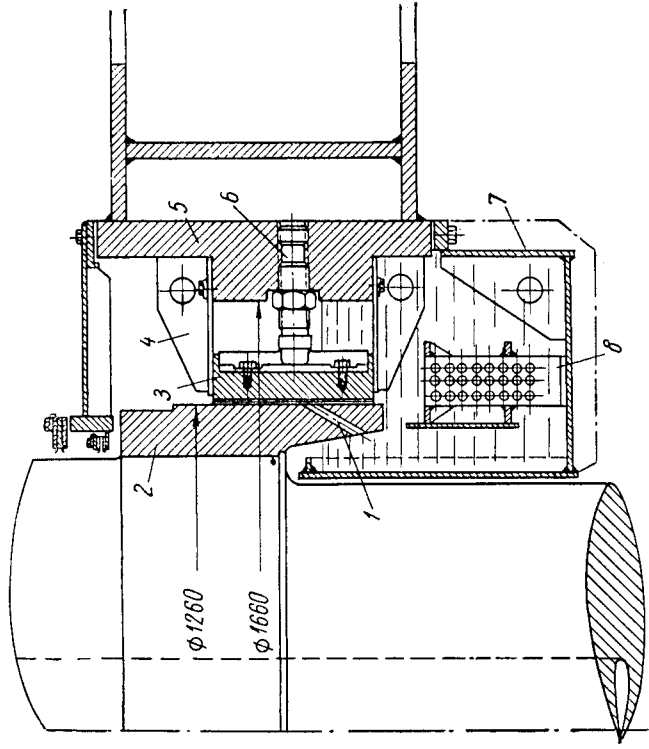


Рис. 1-45. Сегментный направляющий подшипник

трубок, по которым циркулирует охлаждающая вода. Для предот-
 вращения попадания в масляную ванну подшипника пыли или
 каких-либо посторонних предметов ее закрывают сверху крышкой,
 оканчивающейся со стороны вала сальниковым уплотнением.

Нижний направляющий подшипник в гидрогенераторе зонтич-
 ного типа или верхний — в подпятнике типа объединяют часто в один
 конструктивный узел с подпятником, как показано на рис. 1-46.
 В этом случае подпятник и направляющий подшипник имеют одну
 общую масляную ванну, в которой устанавливают трубчатые масло-
 охладители. Сегменты направляющего подшипника крупного гидро-
 генератора изготавливают следующим образом. На карусельном
 станке обрабатывают кольцевую заготовку, на внутренней поверх-
 ности которой растачивают кольцевые канавки формы ласточкина
 хвоста. Далее производят разметку и разрезание кольца на сегмен-
 ты, которые после механической обработки (сверления и резьбона-
 резания отверстий, фрезерования паза) заливают баббитом. Сег-

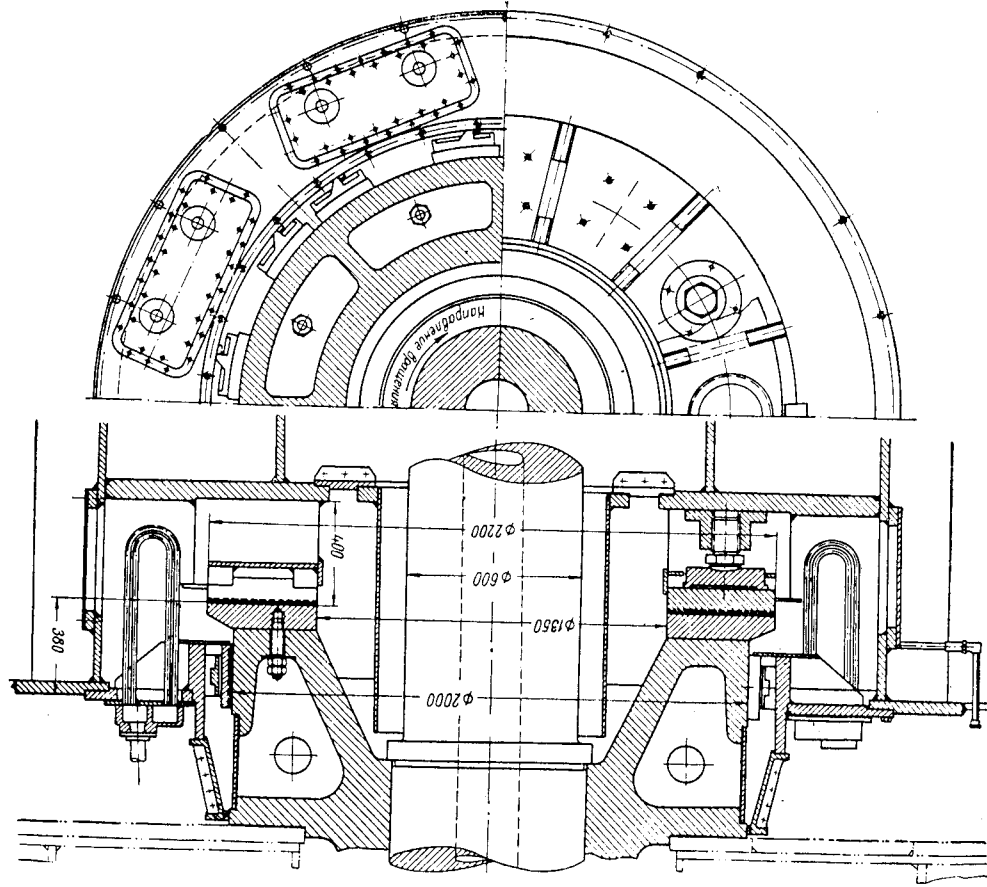


Рис. 1-46. Комбинированный подпятник и направляющий подшипник гидрогенератора

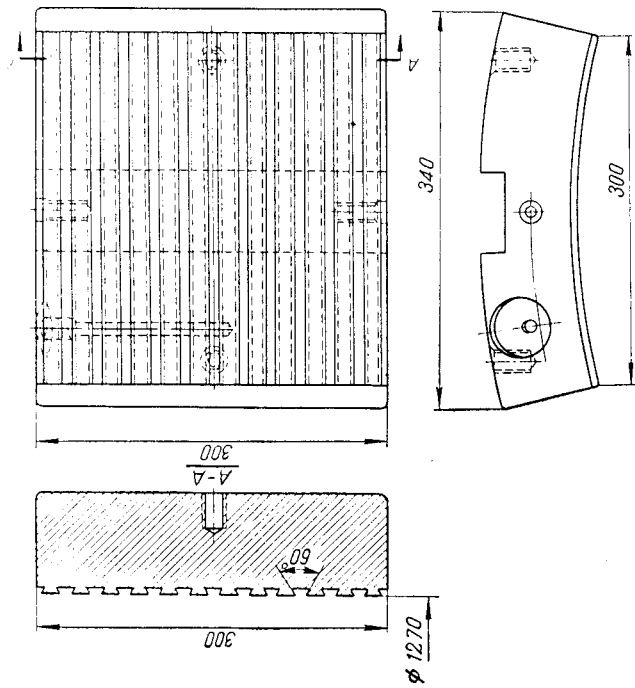


Рис. 1-47. Сегмент направляющего подшипника, обработанный под заливку баббитом

мент направляющего подшипника, обработанный под заливку баббитом, изображен на рис. 1-47. После заливки сегмента баббитом производят растачивание его на внутреннем цилиндре с последующим шабрением его поверхности трения.

§ 1-14. ПОДШИПНИКОВЫЕ ТОКИ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Магнитная цепь гидрогенератора не является строго симметричной из-за наличия стыков между отдельными частями статора (в разъемном статоре), эксцентричного положения ротора, наличия стыков между перекрывающимися друг друга сегментами листов статора, канавок для шпонок, которыми крепят сегменты к корпусу, отверстий в пакете листов, сквозь которые пропускают стяжные болты.

При таком несимметричном в магнитном отношении устройстве контур, образуемый валом гидрогенератора, верхним направляющим подшипником или подпятником, верхней крестовиной, статором, нижней крестовиной, нижним направляющим подшипником (или подпятником), оказывается сцепленным с изменяющимся во времени магнитным потоком. Этот поток наводит в указанном контуре э. д. с. обычно не более 2—3 в, под действием которой в нем протекают токи, называемые подшипниковыми, которые замыкаются через рабочие поверхности подшипников и подпятника и повреждают

их вследствие электроэрозии. Опыт показал, что слой масла между рабочими поверхностями подшипников не является достаточной изоляцией от подобных токов. Для устранения подшипниковых токов диск подпятника электрически изолируется от втулки ротора твердой изоляционной прокладкой. Прокладками также изолируются и сегменты направляющих подшипников от своих гнезд (от корпуса подшипника). В каждом конкретном случае изоляционные прокладки устанавливаются в наиболее удобных местах конструкции, но с таким расчетом, чтобы не могло образоваться замкнутых электрических контуров для подшипниковых токов.

§ 1-15. КРЕСТОВИНЫ

Верхняя и нижняя крестовины гидрогенератора предназначены главным образом для размещения в них направляющих подшипников и подпятника.

Крестовину, в которой размещают подпятник, называют опорной, или грузонесущей. Она воспринимает на себя усилия, передаваемые подпятником, от весов ротора гидрогенератора и рабочего колеса турбины, а также от вертикальной составляющей давления воды на рабочее колесо турбины. Поэтому вес и высота опорной крестовины получаются большими, особенно при значительных ее радиальных размерах. В гидрогенераторах подвесного типа нижние крестовины имеют более легкую конструкцию, хотя по условиям перевозки в крупных гидрогенераторах их выполняют разборными. Они служат для установки в них нижнего направляющего подшипника (если он предусмотрен в конструкции) и установки тормозов-домкратов. Нижние крестовины опираются на железобетонное кольцо фундамента. В некоторых конструкциях гидрогенераторов при одном верхнем направляющем подшипнике и размещении подпятника в верхней крестовине или на крышке турбины нижняя крестовина может отсутствовать, как, например, в волгоградском (рис. 1-3) и братском (рис. 1-4) гидрогенераторах. В этих случаях тормоза-домкраты устанавливаются непосредственно на железобетонное кольцо фундамента. Верхняя крестовина имеет у каждого гидрогенератора, даже если он зонтичного типа без верхнего направляющего подшипника, так как она служит в этом случае опорой для статоров возбuditелей и подвозбудителей. Пространство между лапами верхней крестовины перекрывают стальными листами для предотвращения попадания посторонних предметов на вращающийся ротор. Верхняя крестовина опирается на верхний фланец корпуса статора и крепится болтами. Все крестовины гидрогенераторов выполняют, как правило, сварными.

В зависимости от нагрузки и радиального размера крестовине придают одну из двух конструктивных форм:

1) мостовую с двумя (рис. 1-48) или четырьмя (рис. 1-49) балками таврового сечения;

2) лучевую с отъемными, радиально расположенными лапами (рис. 1-50).

Мостовые крестовины с двумя балками таврового сечения, по форме напоминающие ферму моста (рис. 1-48), применяют при относительно небольших нагрузках на крестовину и небольших

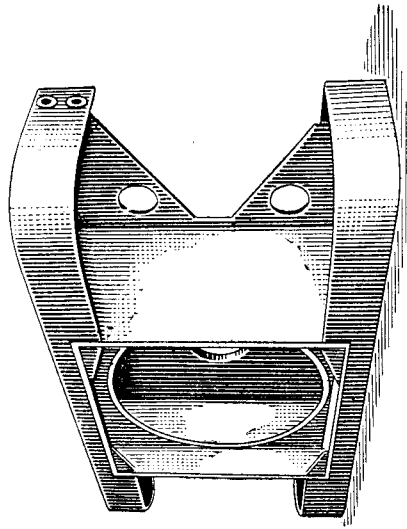


Рис. 1-48. Мостовая крестовина с двумя балками

диаметрах статоров. Они просты по устройству и не требуют больших механических обработок. Мостовые крестовины полностью изготавливают на заводе и целиком доставляют на место монтажа

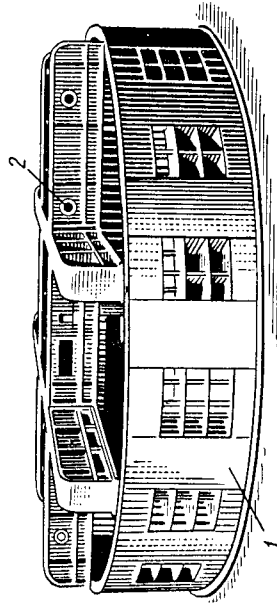


Рис. 1-49. Мостовая крестовина с четырьмя балками: 1 — статор; 2 — верхняя крестовина

кам:

гидрогенератора. Поэтому к ним предъявляют требования транспортабельности по железной дороге, т. е. по размерам они должны вписываться в железнодорожные габариты. В опорной крестовине мостового типа между двумя параллельными балками вваривается центральная часть, которая является ванной подпятника или направляющего подпятника. По диаметру ванны подпятника определяют расстояние между лапами крестовины. Чем больше это рас-

стояние, тем более жесткой приходится выполнять центральную часть крестовины, чтобы прогиб ее от действия нагрузки не превышал определенной величины. При больших нагрузках мостовую крестовину с двумя параллельными балками усиливают еще двумя параллельными балками, расположенными перпендикулярно к основным балкам. Таким образом, получается мостовая крестовина с четырьмя балками таврового сечения (рис. 1-49). При больших радиальных размерах мостовой крестовины с четырьмя балками, не позволяющих перевозить ее по железной дороге целиком, две балки делают

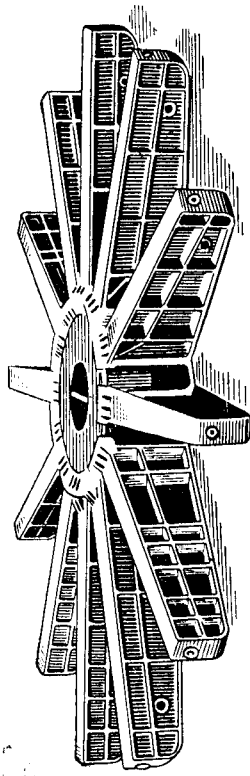


Рис. 1-50. Лучевая крестовина

отъемными и транспортируют отдельно. При перевозке крестовина имеет две балки с вваренной в них центральной частью. На месте монтажа крестовину собирают полностью. При больших диаметрах статоров крестовины мостового типа трудно выполнить, громоздки, превышают железнодорожные габариты, и поэтому выполняют крестовины лучевого типа с отъемными, радиально расположенными лапами (рис. 1-50). Сопряжение отъемных лап с центральной частью крестовины чаще всего выполняют одним из следующих способов.

1. Верхний диск центральной части крестовины соединен с верхними полками лап при помощи стыковых брусьев. Нижний диск соединен с нижними полками лап либо внахлест с креплением конических шпильками (рис. 1-51), либо внакладку сегментами соединительных колец с креплением коническими шпильками (рис. 1-52).

2. Центральная часть крестовины соединена с лапами при помощи стыковых плит и стяжных шпилек (рис. 1-53).

Крестовины полностью собирают и обрабатывают на заводе. После этого их разбирают и упаковывают для отправки на место монтажа. Центральную часть крестовины транспортируют отдельно от лап. Все детали крестовины, подлежащие разборке, обязательно маркируют в собранной крестовине. Места разъема лап с центральной частью штифуют. Благодаря этому достигается хорошая точность сборки крестовины на месте монтажа. Трудоемкость изготовления конструкции, в которой крепление центральной части крестовины с лапами осуществляется посредством стыковых плит со стяжными шпильками (рис. 1-53), значительно ниже, чем конструкции, где это крепление выполняют при помощи конических шпилек

Рис. 1-52. Соединение центральной части верхней крестовины с лапами внакладку с помощью сегментов соединительных колец и конических шпилек:
 1 — верхний диск; 2 — стыковой брус; 3 — лапа; 4 — сегменты соединительного кольца; 5 — нижний диск; 6 — ребра; 7 — кольцо

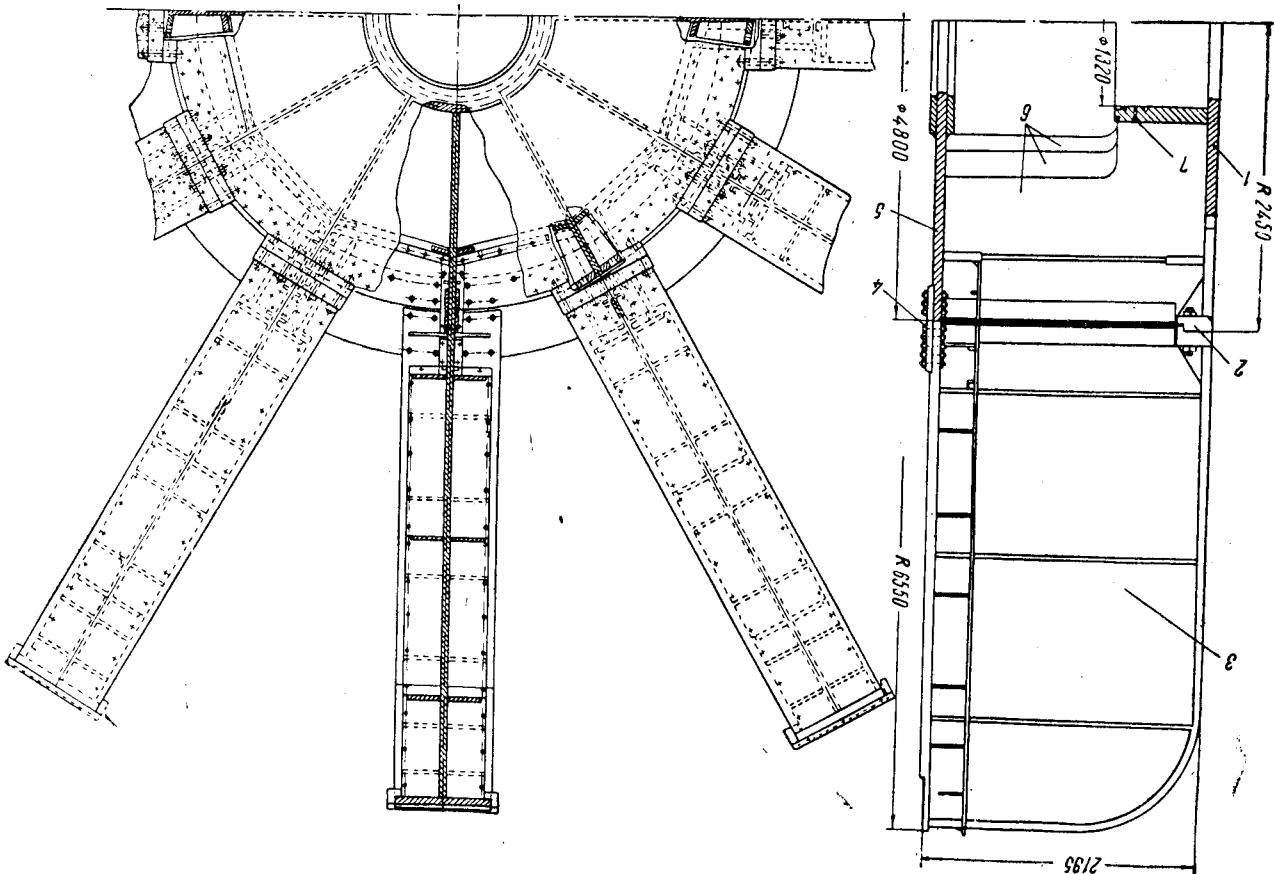
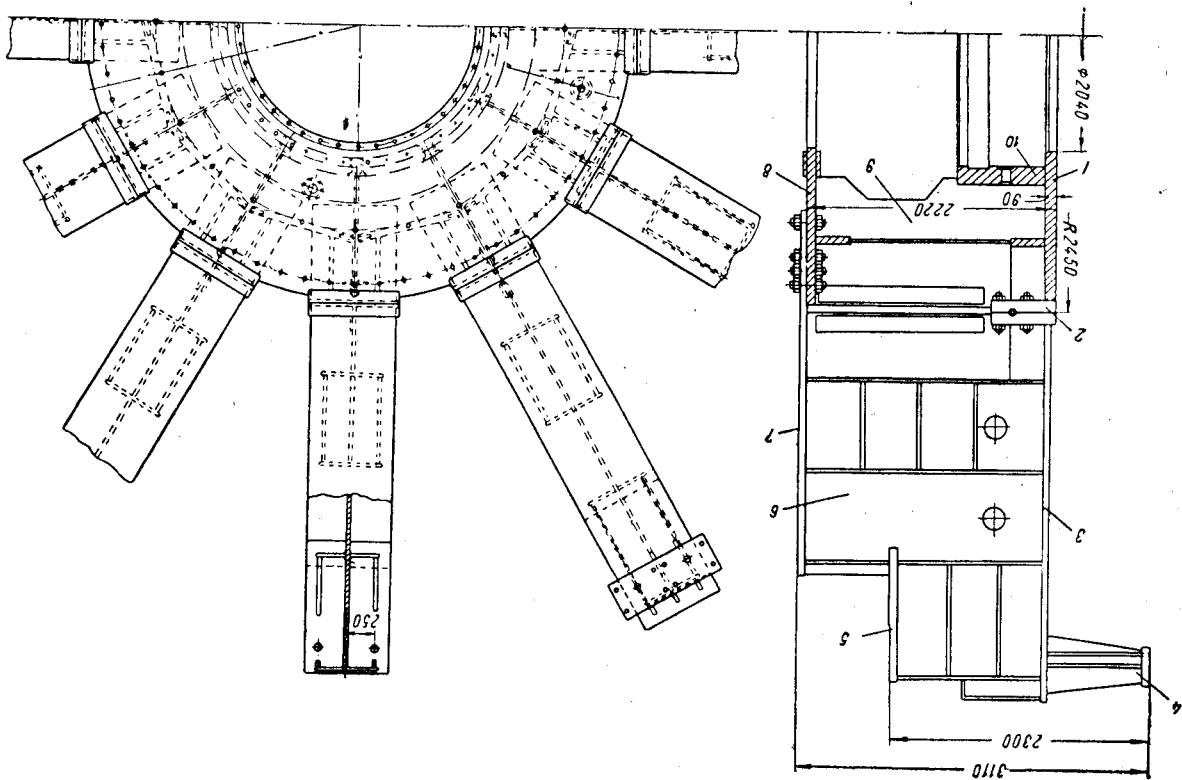


Рис. 1-51. Соединение центральной части нижней крестовины с лапами внахлест и коническими шпильками:
 1 — верхний диск; 2 — стыковые бруссы; 3 — верхняя полка; 4 — подставка под тормоза-домкраты; 5 — нижняя опорная плита лапы; 6 — вертикальное ребро лапы; 7 — нижняя лапа; 8 — верхняя лапа; 9 — нижний диск; 10 — ребро; 11 — кольцо



и накладок (рис. 1-51 и 1-52). Однако при изготовлении крестовин со стыковыми плитами особое внимание обращают на тщательную пригонку лап при приварке их к стыковым плитам, так как при неточной пригонке крестовину приходится разбирать, фрезеровать стыковые плиты в плоскости разъема на ее центральной части и лапах и затем полностью собирать крестовину еще раз с перешлифовкой стыковых плит.

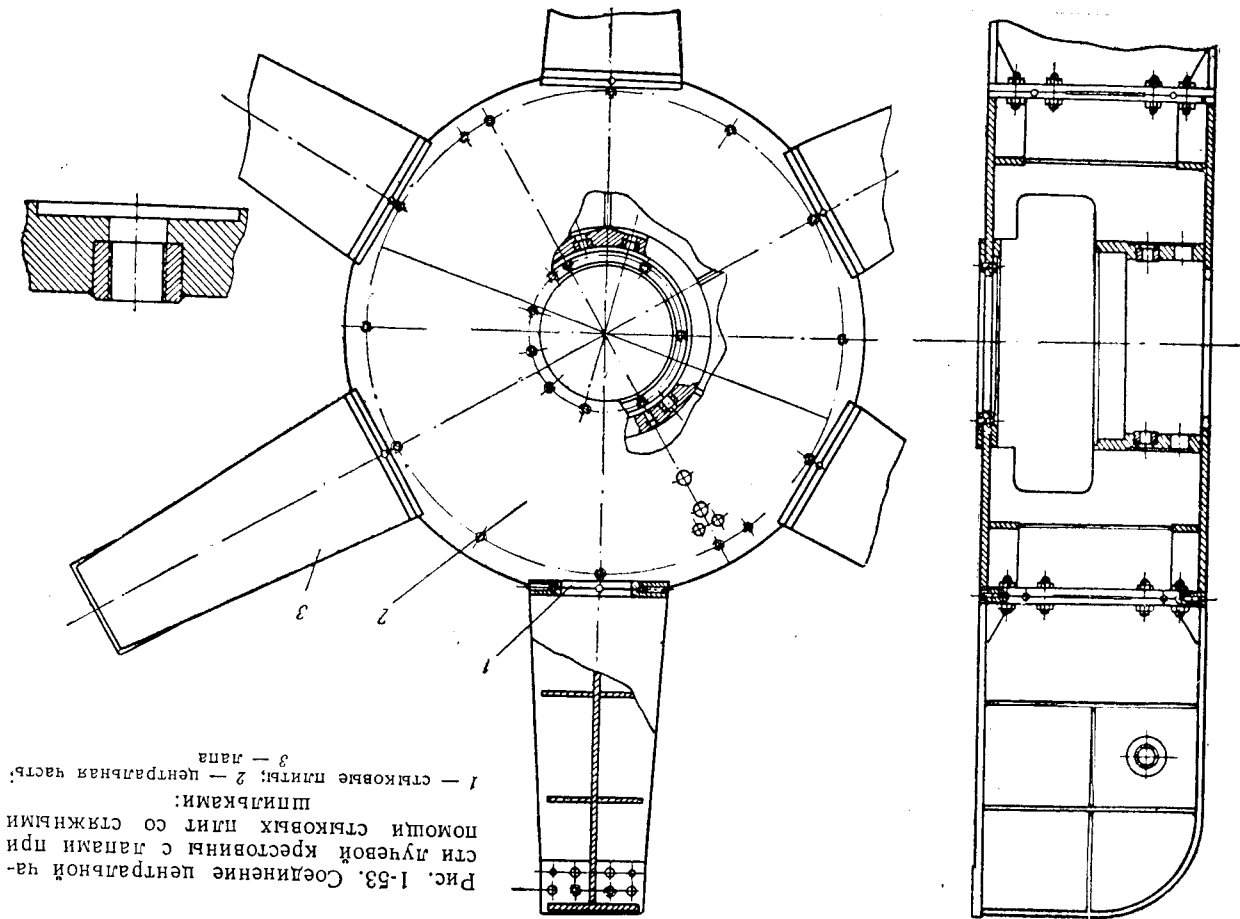
§ 1-16. СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ

Воздухоохладители

При работе гидрогенератора часть его мощности в количестве примерно 2—8% от номинальной теряется внутри генератора. Гидрогенераторы больших мощностей имеют меньшие относительные потери, а гидрогенераторы меньших мощностей — большие относительные потери. Потери мощности можно классифицировать на три основные группы: магнитные, электрические и механические. Все потери мощности превращаются в тепло, которое нагревает гидрогенератор.

Для предупреждения чрезмерных превышений температур отдельных частей гидрогенератора при работе его необходимо искусственно охлаждать, т. е. отводить выделяемое в гидрогенераторе тепло во внешнюю среду. Для этого через гидрогенератор прогоняют воздух, который, соприкасаясь с его нагретыми частями, нагревается и, выходя из него, уносит с собой тепло, создавая непрерывный поток тепла из генератора. Охлаждение гидрогенераторов посредством потока воздуха при любой конструктивной форме решения подачи воздуха и омывания им нагретых частей называют вентиляцией гидрогенераторов. Учитывая, что с увеличением поверхности нагретого тела увеличивается его теплоотдача, в сердечнике статора предусматривают специальные каналы, через которые прогоняется охлаждающий воздух.

Воздушный напор, необходимый для преодоления сопротивления воздушного потока, создается вращающимися выступающими полюсами ротора, спицами остова ротора, вентиляционными распорками, устанавливаемыми в каналах обода ротора, и специальными лопатками, прикрепленными к торцовым плоскостям обода ротора. Благодаря воздушному напору, созданному вращающимся действием вращающихся частей ротора, одна часть холодного воздуха проходит между полюсами, охлаждая катушки обмотки возбуждения, поступает в воздушный зазор и затем в вентиляционные каналы сердечника статора, охлаждая его. Другая часть охлаждающего воздуха, благодаря действию лопаток 4 (рис. 1-55) вентилятора, прикрепленных к ободу ротора, проходит через лобовые части обмотки и охлаждает их. Нагретый воздух поступает в воздушные отсеки корпуса статора. Дальнейший ход воздуха зависит от типа системы вентиляции.



Системы вентиляции гидрогенераторов

Все существующие системы вентиляции по их основному принципу можно разделить на два типа: разомкнутая, или протяжная, система и замкнутая система.

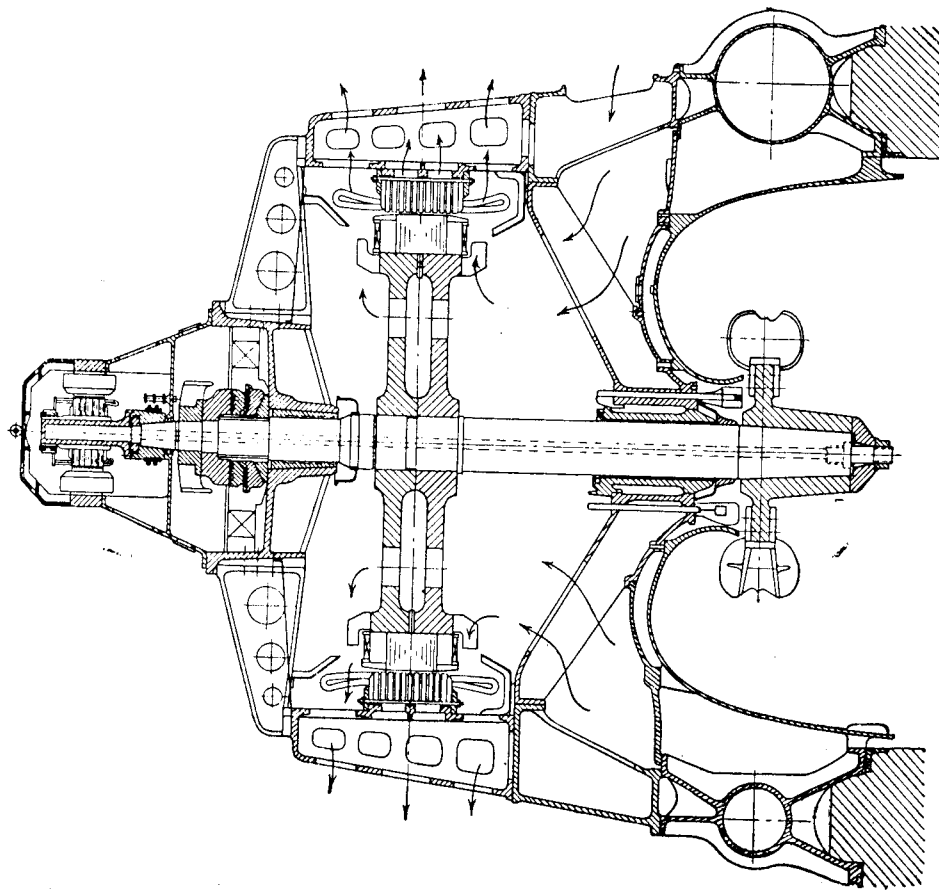


Рис. 1-54. Разомкнутая система вентиляции в гидрогенераторе на 13300 квз, 250 об./мин

При разомкнутой системе вентиляции, применяемой обычно в гидрогенераторах небольшой мощности, охлаждающий воздух поступает непосредственно из машинного зала (рис. 1-54) или по бетонному каналу из турбинной шахты, а нагретый в гидрогенераторе воздух выбрасывается в машинный зал или по закрытому каналу за пределы станции.

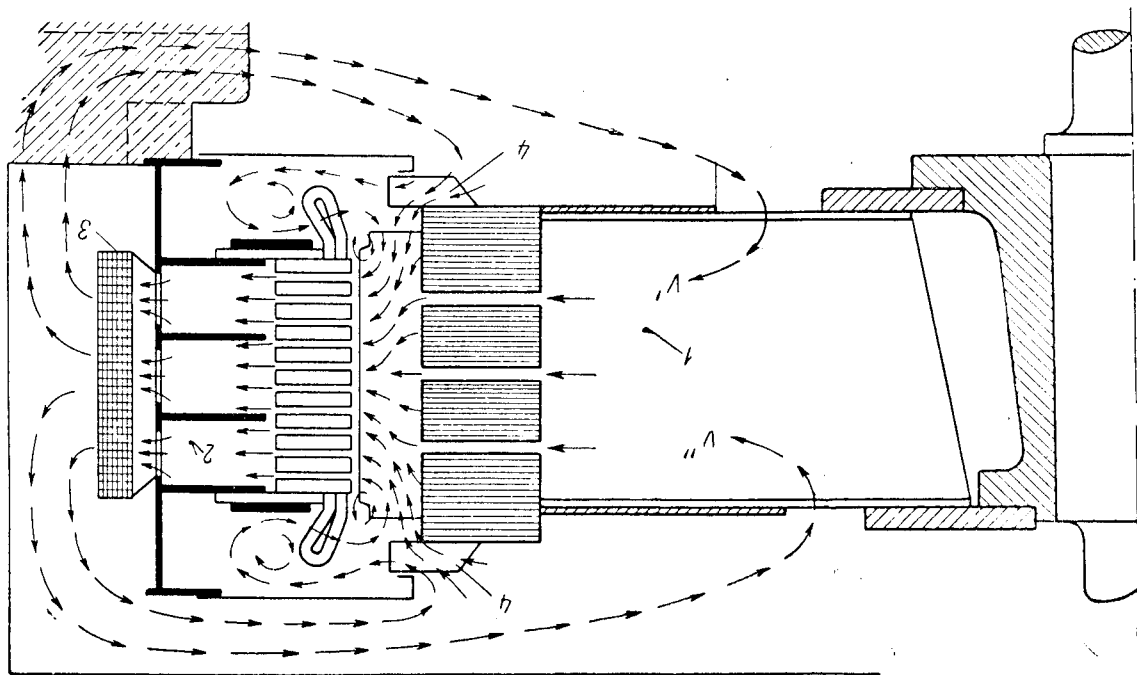


Рис. 1-55. Замкнутая система вентиляции: 1 — ротор; 2 — статор; 3 — воздухоохладитель; 4 — лопатки вентилятора, прикрепленные к ободу ротора

К недостаткам разомкнутой системы вентиляции относятся трудность охлаждения гидрогенератора летом в местностях с жарким климатом, когда температура окружающего воздуха превышает 30—35° С, трудность выполнения противопожарных устройств

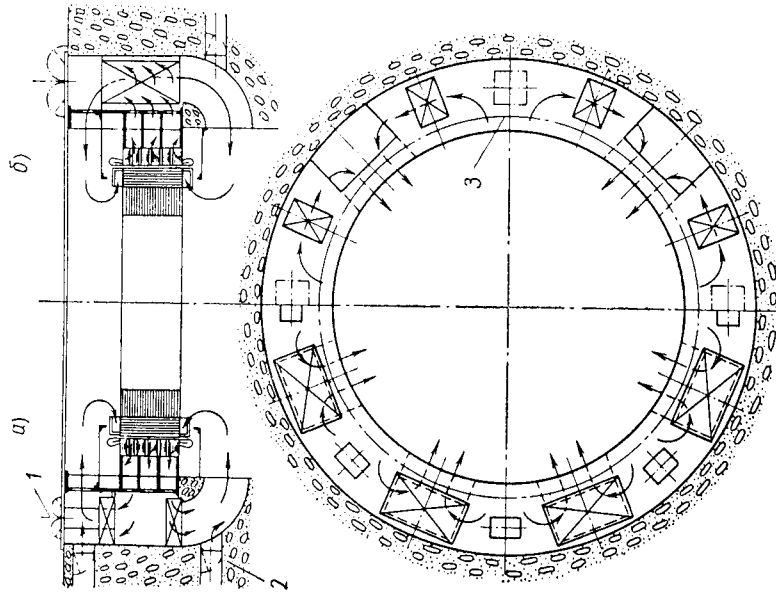


Рис. 1-56. Две схемы замкнутой системы вентиляции:

а) — двухрядное горизонтальное расположение воздухоохладителей; б) — радиальное расположение воздухоохладителей (вертикальное); в) — выпуск горячего воздуха для отопления; 2 — подвод добавочного свежего воздуха при использовании горячего воздуха для отопления; 3 — статор

и невозможность ее применения в районах с большой запыленностью воздуха. Последнее объясняется тем, что при больших объемах запыленного воздуха, прогоняемого через гидрогенератор, пыль постепенно оседает на стенках вентиляционных каналов и на лобовых частях обмотки. При этом значительно ухудшается передача тепла нагреваемых частей гидрогенератора воздуху и уменьшается расход охлаждающего воздуха через гидрогенератор, вследствие уменьшения сечения вентиляционных каналов, что неизбежно приводит к его перегреву. Все эти недостатки устраняются при разомкнутой системе вентиляции (рис. 1-55), которая применяется

почти во всех гидрогенераторах (исключение составляют лишь гидрогенераторы небольшой мощности, где возможна и разомкнутая система).

При разомкнутой системе вентиляции в гидрогенераторе циркулирует один и тот же объем воздуха. Поэтому попадание пыли в гидрогенератор извне при разомкнутой системе вентиляции полностью исключено.

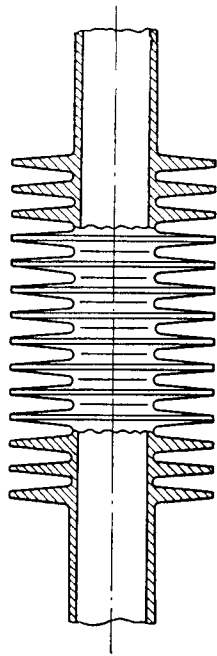


Рис. 1-57. Трубка воздухоохлаждителя с оребрением, представляющим одно целое с трубкой

Для охлаждения нагретого воздуха на пути его следования устанавливаются специальные воздухоохлаждители 3 (рис. 1-55), количество которых определяется расчетом. Воздух, проходя через воздухоохлаждители, охлаждается и двумя потоками (сверху и снизу) подходит к ротору.

На рис. 1-56, а и б показаны две другие схемы расположения охладителей: горизонтальное двухрядное (рис. 1-56, а), вертикальное радиальное (рис. 1-56, б), отличающиеся от схемы (рис. 1-55) тем, что воздух направляется из сердечника статора не сразу в охладитель, а в отсек горячего воздуха в корпусе статора, где он разветвляется на два параллельных потока. Каждый поток проходит через охладитель, охлаждается и поступает в отсек холодного воздуха, откуда подводится двумя потоками сверху и снизу к ротору. В холодное время года часть нагретого в генераторе воздуха, минуя охладители, через специальные люки подает в машинный зал для его обогрева. В этом случае выпускаемый в машинный зал воздух компенсируется поступлением через фильтр свежего холодного воздуха извне в вентиляционную систему гидрогенератора.

Воздухоохлаждители состоят из нескольких рядов латунных трубок, завальцованных кольцами в трубные доски. Холодную воду к трубкам подводят через полые крышки, прикрепленные болтами к трубным доскам. В крышках воздухоохлаждителей устроены перегородки, которые делят трубки на несколько групп, так что вода проходит последовательно по отдельным группам трубок, совершая в воздухоохладителе несколько последовательных ходов. Для увеличения наружной поверхности охладителей, омываемой воздухом, в них применяют трубки с оребрением в виде навитой и припаянной спирали из гофрированной ленты или в виде навитой и припаянной

спирали из тонкой медной проволоки. Однако все эти типы охлаждающих трубок имеют относительно большие переходные тепловые сопротивления в местах припайки оребрения к трубке, которые в значительной степени зависят от качества припайки и требуют большой затраты олова. Этих недостатков не имеют профильные трубки, разработанные ЦНИИТМАШ. Оребрение профильных трубок представляет собой спираль, составляющую одно целое со стенкой трубки (рис. 1-57). Первые охладители с профильными трубками испытаны и показали хорошие результаты.

§ 1-17. ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА

При остановке гидрогенератора прекращают доступ воды на рабочее колесо турбины путем закрытия лопаток направляющего аппарата. Однако и после прекращения доступа воды на рабочее колесо турбины ротор гидроагрегата (ротор гидрогенератора и сларенное с ним рабочее колесо турбины) продолжает длительное время (в пределах часа, а иногда и больше) вращаться под действием запасенной кинетической энергии. При остановке гидрогенератора благодаря потерям на трение ротора о воздух и трение в подпятнике. Потери на трение о воздух пропорциональны кубу окружной скорости, поэтому сначала ротор тормозится быстро, а затем, по мере уменьшения скорости, торможение от трения о воздух резко уменьшается и ротор длительное время вращается с малой скоростью. Длительное вращение ротора с малой скоростью недопустимо по условиям работы подпятника, так как при этом нарушается клинообразная масляная пленка и жидкостное трение сменяется сухим трением, при котором подпятник может выйти из строя. Чтобы не подвергать подпятник опасности выхода из строя, ротор, достигший примерно половины номинальной скорости, быстро останавливают при помощи тормозов. Второй причиной применения тормозов является просачивание воды через закрытый направляющий аппарат турбины (иногда даже при опущенных щитах).

Просочившаяся вода создает вращающий момент, и полную остановку ротора в этом случае возможно произвести только тормозами. Тормоза останавливают на нижней крестовине или непосредственно на фундаменте. Наиболее распространены являются воздушный тип тормоза, состоящий из стального цилиндра с поршнем. К верхней торцовой части поршня прикреплен колодка со сменной фрикционной подушкой из ферроасбеста, которая при торможении прижимается к тормозному диску или тормозному сегменту, укрепленному на ободке ротора. Воздух давлением около 7 ат подается под поршень через отверстие в нижней части цилиндра.

При отгормаживании воздух из цилиндров выпускают и поршни вместе с подушками возвращаются в нижнее положение пружинами. В небольших генераторах допускается торможение маслом при том

же давлении — около 7 ат. Тормозы одновременно служат также домкратами для подъема ротора перед пуском при смачивании поверхностей трения (если это необходимо) и для подъема ротора при осмотре и ремонте подпятника. В этом случае в цилиндры тормозов-домкратов специальным насосом подают масло под давлением около 100 ат. После подъема ротора поршни тормозов-домкратов фиксируют в поднятном положении запорными кольцами, а масляное давление снимают. К тормозной системе относят также трубопровод высокого давления с арматурой, кран для впуска и выпуска воздуха, трехходовой кран для переключения системы торможения с воздушной линии станции на масляный насос, манометры низкого и высокого давления.

§ 1-18. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Контактные кольца в гидрогенераторах выполняют из стали. Крепление на валу контактных колец может быть различным. Одна из конструкций крепления контактных колец предусматривает посадку их в горячем состоянии на стальную или чугунную втулку, наружная поверхность которой предварительно изолирована опресованным и запеченным на втулке миканитом. Втулку с надетыми на нее кольцами плотно насаживают на вал. В другой конструкции на вал насаживают специальный кольцевой держатель из чугуна или стали, к торцовым плоскостям которого с двух сторон крепят контактные кольца при помощи болтов, изолированных относительно колец изоляционными втулочками и шайбами.

При больших диаметрах каждое контактное кольцо образуют из двух стальных сболченных полуколец. Токосвод присоединяют к контактным кольцам шпильками, которые плотно запрессовывают конусными хвостами в соответствующие гнезда колец.

§ 1-19. СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Система возбуждения является одним из наиболее ответственных элементов гидрогенератора. Возбуждение гидрогенераторов может быть электромашинным и ионным.

Электромашинное возбуждение

При электромашинном возбуждении ротор гидрогенератора получает постоянный ток для возбуждения от электрической машины постоянного тока, называемой *возбудителем*. Возбудитель рассчитывают на полную мощность, даваемую обмотке возбуждения генератора при максимально возможном токе форсировки. Возбуждение возбудителя может быть параллельным, смешанным или независимым, когда обмотка возбуждения возбудителя питается от электрической машины постоянного тока небольшой мощности, называемой *подвозбудителем*. Наличие подвозбудителя облегчает регулирование

тока возбуждения гидрогенератора, а также уменьшает размеры регулировочных реостатов, регулировочной аппаратуры.

Наряду с этим наличие подвозбудителя в схеме возбуждения имеет свои недостатки: увеличивается инерционность схемы возбуждения, вероятность аварии в системе возбуждения гидрогенератора из-за выхода из строя подвозбудителя во время работы. Поэтому в последнее время предпочтительной схемой возбуждения подвозбудителя является схема с параллельным или смешанным самовозбуждением. В зависимости от привода возбуждителя электромашинное возбуждение может быть прямым или косвенным. При прямом возбуждении возбуждитель и подвозбудитель находятся на одном валу с ротором гидрогенератора. Такая система является наиболее надежной системой и поэтому ее, как правило, применяют для возбуждения гидрогенераторов.

Косвенная система возбуждения отличается от прямой тем, что возбуждатель (и подвозбудитель) устанавливаются на отдельном фундаменте и приводятся во вращение асинхронным или синхронным двигателем. Питание двигателя осуществляется от системы собственных нужд станции или от специального синхронного гидрогенератора, который приводится во вращение своей гидравлической турбиной, или от вспомогательного синхронного генератора, размещаемого на одном валу с главным гидрогенератором.

Преимущества косвенной системы возбуждения заключаются в том, что возбуждатель рассчитывают на большую скорость, чем в системе прямого возбуждения, и поэтому он имеет малые размеры и малую электромагнитную инерционность. Однако, как показал опыт, надежность работы такой системы значительно ниже надежности работы системы прямого возбуждения, и поэтому ее применяют редко. Подвод тока от возбуждителя к обмотке возбуждения гидрогенератора осуществляется кабелем и медными изолированными шинами через скользящий контакт щетки — контактные кольца.

Ионное возбуждение

Ионное возбуждение является наиболее быстродействующим видом возбуждения, что имеет большое значение для устойчивой работы гидрогенераторов на длинные линии. Кроме того, применение ионного возбуждения во многих случаях оказывается экономически оправданным, в частности для мощных тихоходных гидрогенераторов с повышенными потолочными напряжениями возбуждения. Из многочисленных схем ионного возбуждения практически найдена применение в настоящее время схема независимого ионного возбуждения (рис. 1-58).

Основными элементами независимого ионного возбуждения являются ионный преобразователь с устройствами управления и специальный вспомогательный синхронный генератор, размещаемый на одном валу с главным гидрогенератором.

Возбуждение вспомогательного гидрогенератора может быть прямым электромашинным от возбуждителя с самовозбуждением или по схеме самовозбуждения с полупроводниковыми выпрямителями.

§ 1-20. РЕГУЛЯТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Регуляторный генератор — это синхронный генератор мощностью в несколько киловольтампер, полюсами ротора которого для надежной его работы являются постоянные магниты из специального сплава. Магнитное поле в воздушном зазоре генератора, создаваемое постоянными магнитами, обратно пропорционально зазору. Поэтому воздушный зазор в генераторе выбирают как можно меньшим. Чтобы при этом не произошло задевания ротора за статор при биениях вала, вал регуляторного генератора помещают в своих подшипниках качения и укрепляют с валом гидрогенератора гибким соединением.

Регуляторный генератор обычно размещают наверху гидрогенератора. В некоторых случаях ротор регуляторного генератора насаживают непосредственно на вал гидрогенератора. При этом его размещают вблизи направляющего подшипника. Назначение регуляторного генератора — питать синхронный двигатель, приводящий во вращение маятниковый регулятор скорости турбины. При такой системе вал маятникового регулятора вращается со скоростью, находящейся в жесткой зависимости от скорости вращения вала гидрогенератора.

§ 1-21. ПРОТИВОПОЖАРНОЕ УСТРОЙСТВО

Для тушения возникшего в гидрогенераторе пожара предусмотрено противопожарное устройство. Оно выполнено в виде двух кольцевых труб с многочисленными отверстиями, расположенных против лобовых частей обмотки статора. Обе кольцевые трубы присоединяют к питающей трубе, которая выведена на корпус гидрогенератора. При возникновении пожара генератор отключают от сети, гасят поле возбуждения и от пожарного трубопровода включают воду в противопожарное устройство.

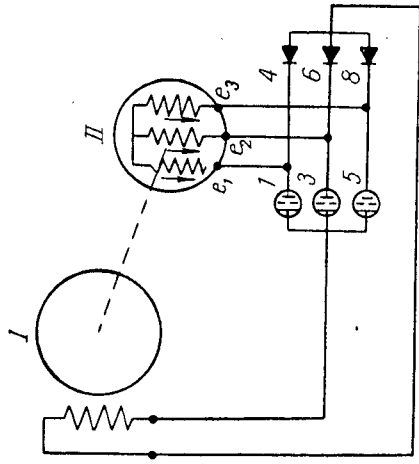


Рис. 1-58. Принципиальная схема независимого ионного возбуждения:
I — главный генератор; II — вспомогательный синхронный генератор; 1, 3, 5 и 4, 6, 8 — группы ветвей

§ 1-22. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ С ВНУТРЕННИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ОБМОТОК

В гидрогенераторах с поверхностным охлаждением обмоток циркулирующей в машине воздух омывает наружную поверхность изоляции обмотки статора в зоне лобовых частей и радиальных вентиляционных каналов и внешнюю поверхность катушки обмотки возбуждения.

Часть тепла, выделяющегося в обмотке статора, пройдя через корпусную изоляцию катушки, соприкасающуюся с пакетами сердечника статора, переходит в сердечник статора и передается затем охлаждающему воздуху вместе с магнитными потерями в основном через поверхность пакетов статора, обращенную к радиальным вентиляционным каналам (§ 1-16, 5-1, 5-2). При допустимом перегре обмотки статора (70°C) и обмотки ротора (95°C) в гидрогенераторах с поверхностным охлаждением можно допустить плотность тока в обмотке статора не более $2,5-3 \text{ а/мм}^2$, в обмотке ротора — не более $3,0-3,5 \text{ а/мм}^2$, ток паза — не более 5000 а , линейную нагрузку A — не более 700 а/см и индукцию в зазоре при номинальной нагрузке $B_{\delta н}$ — не более 9000 гс .

Дальнейшее увеличение электромагнитных нагрузок при поверхностном охлаждении оказывается невозможным из-за чрезмерного увеличения перепада температуры в изоляции обмотки статора, превышения температуры омываемых воздухом поверхностей над температурой охлаждающего воздуха, а также из-за увеличения относительных индуктивных сопротивлений рассеяния статора и ротора. Как показано в § 2-2, основные размеры активных частей гидрогенератора заданной мощности и скорости вращения определяются в основном линейной нагрузкой A и индукцией в зазоре $B_{\delta н}$.

Чем больше эти величины, тем меньше размеры и стоимость гидрогенератора. Особое значение имеет увеличение электромагнитных нагрузок для генераторов предельных мощностей. Диаметр ротора гидрогенератора по транспортным и производственным условиям нельзя сделать более 15 м , а длину сердечника — более $3,5 \text{ м}$. При больших скоростях вращения диаметр ограничивается заданной кратностью угонной скорости вращения $k_{уг}$ и должен быть принят менее 15 м .

Предельная мощность гидрогенераторов ограничивается кривыми (рис. 1-59) и при поверхностном охлаждении не превышает 400 Мвт при $k_{уг} = 2,0$. В ближайшее время в СССР для Сибирских рек должны быть построены еще более мощные гидрогенераторы.

Увеличенные допустимые плотности токов в обмотках и линейную нагрузку удается получить благодаря применению внутреннего охлаждения паза и обмоток, при котором охлаждающее вещество проходит по специальным каналам, устроенным в проводах обмоток, и соприкасается непосредственно с проводниками.

При этом типе охлаждения удается существенно развить поверхность охлаждения и исключить перепад температуры в изоляции обмотки.

Внутреннее охлаждение обмоток широко применяют в турбогенераторах. В качестве охлаждающего вещества используют водород повышенного давления и дистиллированную воду. Сравнение охлаждающей способности этих веществ с охлаждающей способностью воздуха дано в табл. 1-2. Применить для охлаждения гидрогенераторов водород не представляется возможным из-за непреодолимых трудностей при уплотнении объема водорода, заключенного в машине.

Таблица 1-2
Эффективность внутреннего охлаждения различными веществами по сравнению с воздухом

Параметры	Воздух при 1 ата	Водород		Вода
		1,03 ата	3,0 ата	
Удельная весовая теплоемкость	1	14,35	14,35	3,75
Плотность	1	0,07	0,21	1000
Удельная объемная теплоемкость	1	1,0	3,02	3750
Примерная способность к теплоудалению*)	1	1,0	3,0	125,0
Коэффициент теплопередачи от поверхности канала к охлаждающей среде**)	1	1,5	3,6	60,0

*) Под примерной способностью к теплоудалению понимаем количество тепла, которое можно удалить от обмотки при допустимом перегреве и практически приемлемом давлении на входе в канал.

***) Коэффициенты теплопередачи даны для турбулентного движения в длинном узком канале (практически достижимые значения).

Наиболее приемлемым для гидрогенератора является охлаждение дистиллированной водой. При значительно более низкой, чем в генераторах с поверхностным охлаждением, температуре обмоток (порядка 50°C) плотность тока в обмотках, охлаждаемых водой, можно увеличить в 3—4 раза, линейную нагрузку в 1,5—2,0 раза и индукцию в 1,1—1,2 раза*. Причем индуктивные сопротивления рассеяния генератора возрастает благодаря уменьшению высоты пазов и полюсов лишь незначительно, не превышая допустимых по условиям динамической устойчивости значений.

При тех же основных размерах мощность генератора с полным водяным охлаждением можно увеличить примерно в два раза по сравнению с генератором с поверхностным охлаждением.

Возможность увеличения индукции появляется в генераторе с водяным охлаждением обмоток и сердечника статора за счет исключения радиальных вентиляционных каналов в сердечнике.

нению с поверхностным охлаждением. В два раза возрастает также предельная мощность гидрогенератора (кривые В рис. 1-59).

Несмотря на увеличение плотностей тока в обмотках, к. п. д. генератора с жидкостным охлаждением почти не снижается, благодаря общему уменьшению размеров, снижению температуры обмоток, уменьшению вентиляционных и магнитных потерь в сердечнике статора.

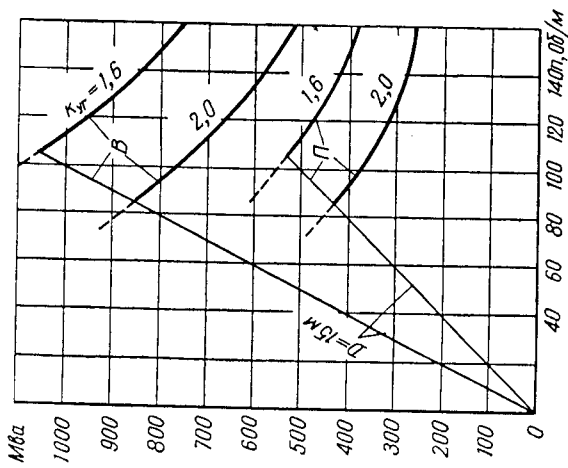


Рис. 1-59. Предельные мощности гидрогенераторов: П — поверхностное охлаждение, В — внутреннее охлаждение

Наибольшие конструктивные трудности вызывает выполнение жидкостного охлаждения вращающейся обмотки возбуждения. Поэтому наряду с жидкостным охлаждением применяют внутреннее воздушное охлаждение обмотки возбуждения, при котором также удается получить существенное увеличение плотности тока обмотки ротора. В генераторе со смешанным внутренним охлаждением (жидкостным охлаждением обмотки статора, внутренним воздушным охлаждением обмотки ротора и воздушным охлаждением сердечника статора при помощи радиальных каналов) удается получить мощность, в 1,7—1,8 раза большую, чем при поверхностном охлаждении.

Устройство обмотки статора с внутренним водяным охлаждением

Плетеные стержни обмотки статора (рис. 1-60) образуются из полых элементарных проводников, внутри которых по каналу циркулирует дистиллированная вода. Часть элементарных проводников

стержня может быть выполнена сплошными 1. Тепло, выделяющееся в сплошных проводниках, передается полым проводникам и охлаждающей воде через изоляцию элементарных проводников толщиной около 0,35 мм на две стороны. Для уменьшения температуры, сплошных проводников, можно делать полый проводник неизолированным.

Схема циркуляции воды в обмотке статора составляет обычно таким образом, чтобы ввод воды в обмотку и ее вывод осуществлялся с одной стороны сердечника. В этом случае число последовательно включенных по воде стержней должно быть четным. Охлажденная дистиллированная вода поступает из коллектора 2 (рис. 1-61) через изолирующий гибкий шланг 3 к медному водораспределительному наконечнику стержня 4. Из внутренней полости наконечника вода поступает к отверстиям в полых элементарных проводниках стержня 7. По этим проводникам, унося тепло от обмотки статора, вода попадает в водораспределительный наконечник на другой стороне стержня и из него в следующий стержень, по которому она возвращается на сторону водосборных коллекторов. Из наконечника на этой стороне нагретая вода или поступает с помощью шланга в коллектор нагретой воды, или попадает в последовательно соединенные пары стержней и только после этого возвращается в коллектор нагретой воды. Число параллельных ветвей по воде может достигать нескольких сотен.

Электрические соединения между стержнями производят при помощи выступов на наконечниках стержней, охваченных соединительной скобой 6; соединения тщательно пропаивают.

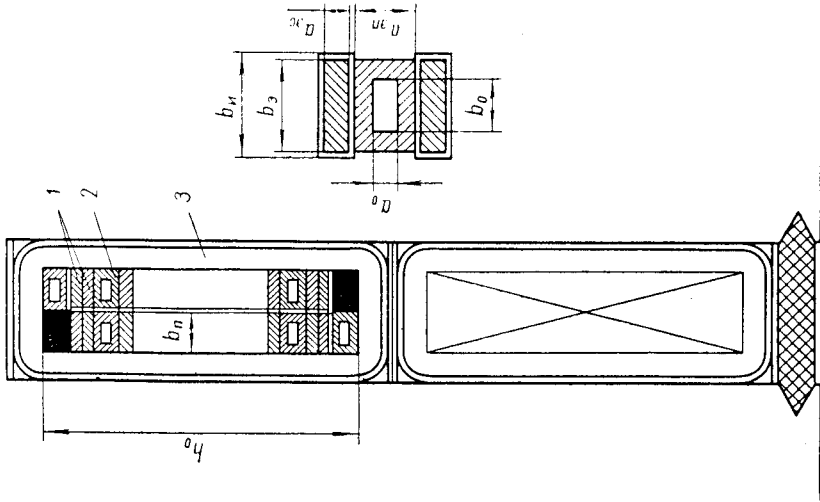


Рис. 1-60. Поперечное сечение паза статора с водяным охлаждением обмотки: 1 — сплошные изолированные элементарные проводники; 2 — полый неизолированный элементарный проводник; 3 — корпусная изоляция стержня

Из коллектора нагретой воды дистиллированная вода течет в теплообменник, охлаждаемый проточной водой. Затем она снова поступает в коллектор охлажденной воды. Циркуляцию дистиллированной воды в замкнутой системе осуществляют при помощи насосов.

К дистиллированной воде, используемой для охлаждения, предъявляют высокие требования в отношении содержания растворенных солей и количества взвешенных частиц. При высоком напряжении обмотки статора соли могут откладываться на стенках проводников, уменьшая сечение отверстия для прохода воды.

Устройство водяного охлаждения обмотки ротора

Разрез полюса гидрогенератора с водяным охлаждением обмотки ротора показан на рис. 1-62. Внутри проводников обмотки возбуждения имеется канал, по которому протекает охлаждающая вода

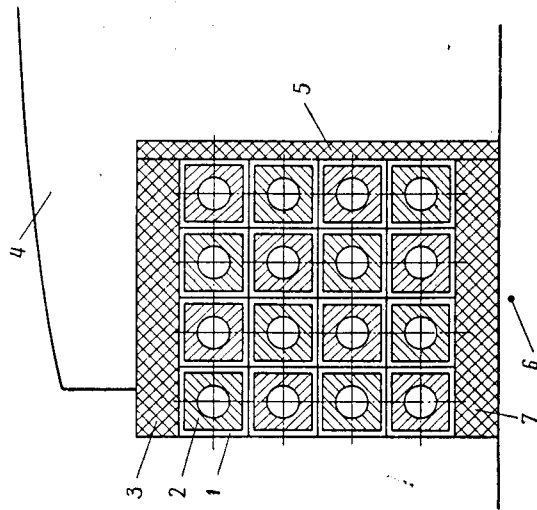


Рис. 1-62. Поперечный разрез обмотки и полюса ротора с внутренним водяным охлаждением:

1 — изоляция проводника; 2 — полая проводник обмотки возбуждения; 3, 5 — изоляция обмотки от сердечника полюса; 4 — сердечник полюса ротора; 6 — обод ротора; 7 — изоляция обмотки от обода ротора

дистиллированная вода. Витки катушки обмотки соединяют по воде последовательно. Для уменьшения необходимого для циркуляции воды напора, число витков обмотки выбирают несколько меньшим, чем в обычных гидрогенераторах, а сечению витка придают форму квадрата. При квадратном сечении канал может быть сделан круг-

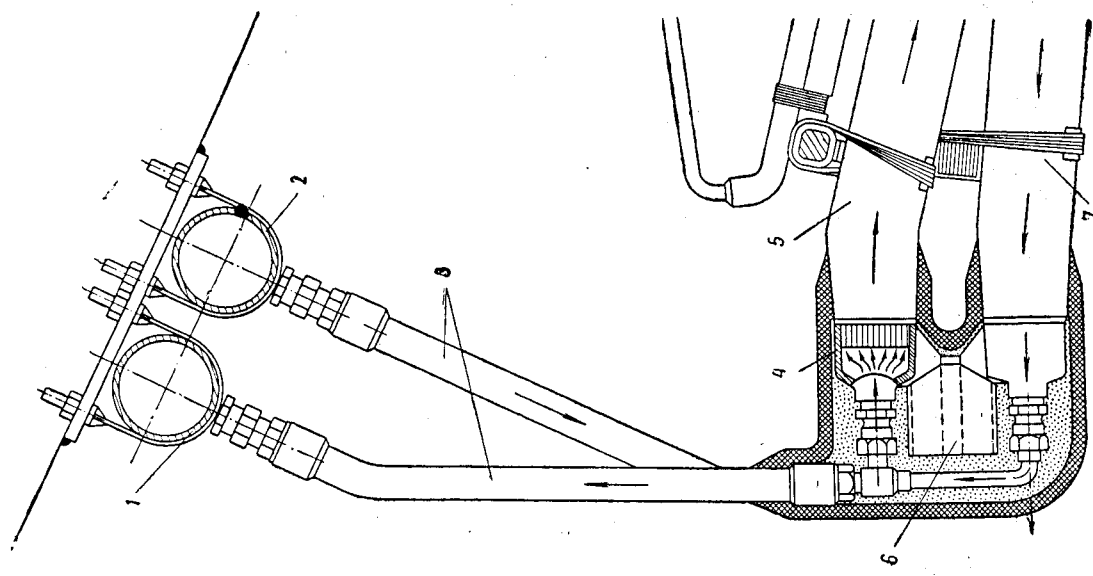


Рис. 1-61. Устройство ввода и вывода воды обмотки статора:

1 — сборный коллектор нагретой воды; 2 — сборный коллектор охлажденной воды; 3 — изолирующие гибкие шланги; 4 — медный водораспределительный наконечник стержня; 5 — стержень, подводящий воду к обмотке; 6 — электрическое соединение между наконечниками стержней; 7 — стержень, отводящий воду от обмотки

лым и его гидравлическое сопротивление получается минимальным. Охлаждение ротора можно осуществить по схеме, представленной на рис. 1-63.

Охлажденная дистиллированная вода свободно (без напора) вливается в приемный вращающийся коллектор ротора 2. Попадающая в коллектор вода отбрасывается центробежными силами во вращающиеся напорные трубопроводы ротора 3, по которым она поступает

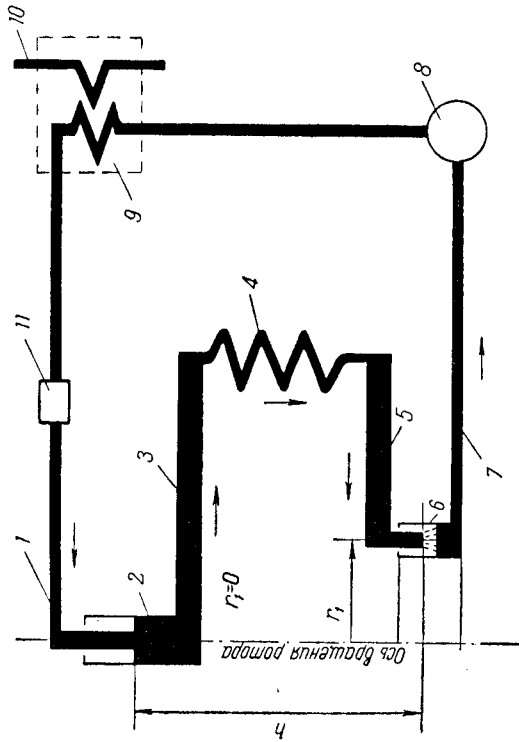


Рис. 1-63. Схема водяного охлаждения обмотки ротора:
1 — трубопровод охлажденной дистиллированной воды; 2 — приемный коллектор ротора; 3 — напорный трубопровод ротора; 4 — катушка обмотки ротора; 5 — сливной трубопровод ротора; 6 — сливной коллектор ротора; 7 — трубопровод нагретой дистиллированной воды; 8 — насос; 9 — теплообменник; 10 — трубопровод проточной воды; 11 — регулятор расхода

к катушкам ротора 4. Пройдя катушки, вода свободно стекает из сливного трубопровода ротора 5 в сливной кольцевой коллектор 6. Необходимый для циркуляции воды в пределах ротора напор создается в основном центробежной силой столба воды, заключенного между радиусами расположения приемного r_1 и сливного r_2 коллекторов.

$$H = 57 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (r_2^2 - r_1^2), \text{ кг/см}^2,$$

где r_2 и r_1 — радиусы, м.

Этот напор суммируется со статическим напором, обусловленным разностью уровней приема и слива воды h .

Регулирование расхода воды производят по уровню воды в приемном коллекторе. Из сливного коллектора дистиллированная вода отсасывается насосом 8, охлаждается проточной водой в теплообмен-

нике 9 и снова поступает в ротор. Благодаря безнапорному сливу и приему дистиллированной воды, ее утечка получается минимальной.

Во вращающихся трубопроводах и каналах обмотки возбуждения развивается значительное статическое давление от центробежных сил. Давление в трубопроводе на радиусе r можно определить по формуле

$$p = 57 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (r^2 - r_1^2), \text{ кг/см}^2.$$

При угонной скорости вращения оно может достигать в крупных гидрогенераторах 100 и более кг/см^2 . Прочность трубопроводов и соединений между их участками должна быть достаточной, чтобы выдерживать такие давления.

Устройство внутреннего воздушного охлаждения обмотки возбуждения

Внутреннее воздушное охлаждение обмотки возбуждения можно осуществить различным путем. В схеме продольного охлаждения поверхность охлаждения проводника 6 обмотки ротора существенно увеличивается при помощи продольного канала (рис. 1-64). Охлажденный воздух вводится в каналы проводников из раздаточной коробки 5, закрепленной между полюсами в зоне широкого центрального канала в обводе 9. Для входа воздуха в канал проводника в последнем предусмотрены прорезы 10 в сторону раздаточной коробки. Для выхода воздуха из канала предусмотрены прорезы 10 в зоне лобовых частей катушки. Таким образом, пройдя по каналу 1/4 часть витка, нагретый воздух выбрасывается в зону торцовых частей. Необходимый для циркуляции воздуха напор образуется центробежной силой столба воздуха, заключенного между направляющими распорками 1 в канале обода и между полюсами.

Воздух, охлаждающий внешнюю поверхность катушек ротора и статора, поступает через узкие каналы обода 8. Для предотвращения смешивания сильно нагретого воздуха из каналов в проводниках ротора и мало нагретого воздуха из радиальных каналов обода 8 предусматриваются воздухоразделяющие перегородки 7, закрывающие вход в межполюсное пространство с торцовых сторон.

В схеме поперечного охлаждения (рис. 1-65) каналы 4 для охлаждающего воздуха располагают поперек полюск обмотки возбуждения. Для образования поперечных каналов проводник обмотки составляется из двух элементарных проводников, один из которых 2 имеет выемки, образующие каналы, а другой 1 — постоянен по сечению. Воздух подводится к поперечным каналам в обмотке из каналов в обводе ротора 9, расположенных против углубления 7 в сердечнике полюса 6. Для равномерного распределения воздуха между поперечными каналами предусмотрен кольцевой канал 5. Необходимый

Для циркуляции воздуха напор образуется центробежной силой столба воздуха между распорками 8 в каналах обода ротора 9 и в каналах 7, 5. Часть охлаждающего воздуха попадает из каналов

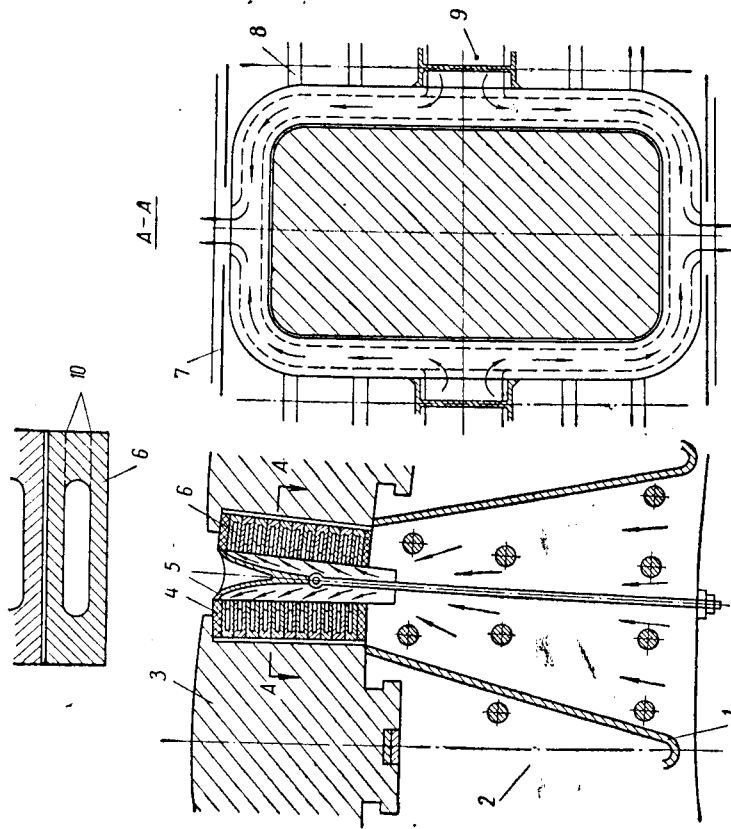


Рис. 1-64. Устройство внутреннего продольного воздушного охлаждения обмотки ротора:

1 — направляющая распорка в канале обода; 2 — обод ротора; 3 — сердечник полюса; 4 — изоляционная шайба; 5 — раздаточная коробка; 6 — полный провод обмотки возбуждения; 7 — воздухоотделительная перегородка; 8 — узкий канал в обode; 9 — широкий канал в обode

обода в межполюсное пространство, смешивается с нагретым воздухом из поперечных каналов и используется для охлаждения статора. При помощи поперечных каналов поверхность охлаждения обмотки ротора можно увеличить в 8—12 раз.

Устройство сердечника статора в гидрогенераторах с внутренним охлаждением

В гидрогенераторе с водяным охлаждением обмоток статора и ротора можно применить водяное охлаждение сердечника статора (рис. 1-66). В этом случае в ядре листов сердечника 1 штамуют отверстия для размещения труб 2, по которым протекает охлаждающая вода. Для того, чтобы в трубах не возникли индуцированные

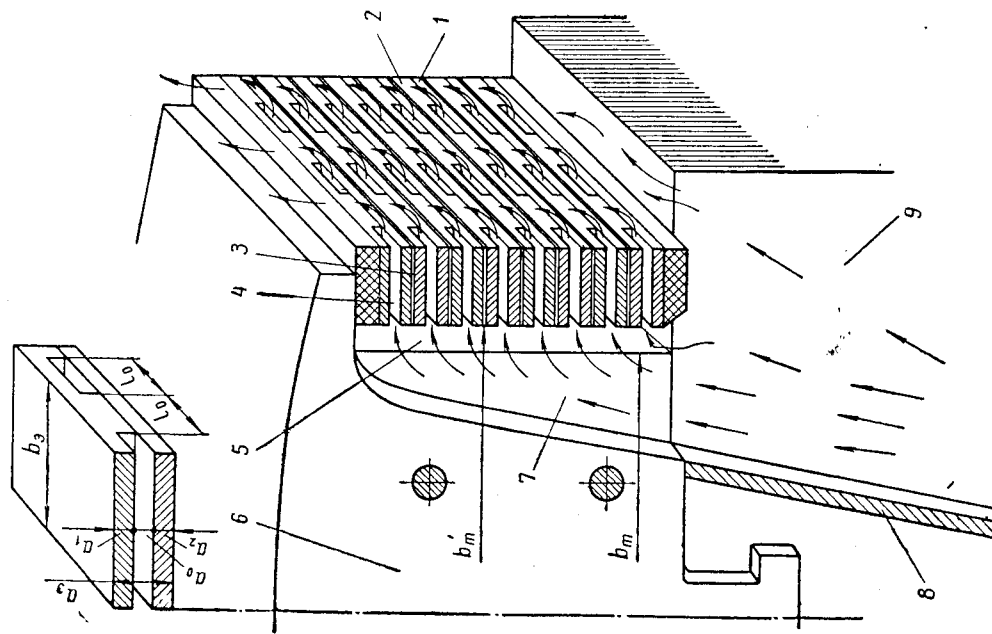


Рис. 1-65. Устройство внутреннего поперечного охлаждения обмотки ротора:

1 — плоский проводник; 2 — проводник с поперечными каналами для прохода воздуха; 3 — межвитковая изоляция; 4 — поперечный канал в проводнике; 5 — канал между обмоткой и полюсом; 6 — сердечник полюса; 7 — углубление в сердечнике полюса для входа воздуха; 8 — воздухонаправляющая распорка в канале обода; 9 — канал в обode ротора

пульсирующим полем токи, их следует располагать на минимальном расстоянии от наружной поверхности сердечника. Для уменьшения теплового сопротивления между трубами и сердечником трубы запрессовывают в собранном сердечнике. Для запрессовки в систему труб подают высокое давление. По воде трубы соединяются последовательно-параллельно. Если учесть отвод тепла только в сторону труб 2, то превышение температуры зубцов над температурой сердечника в зоне труб из-за достаточно большого теплового сопротивления стали вдоль листов может быть довольно большим

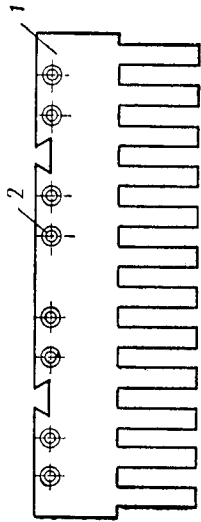


Рис. 1-66. Устройство водяного охлаждения сердечника статора:
1 — сталь сердечника статора; 2 — трубка для воды, запрессованная в сталь статора

(порядка 40—60°). Однако часть потерь сердечника отводится воздухом в зазоре и водой, охлаждающей обмотку статора через изоляцию обмотки, что несколько снижает температуру зубцов.

В генераторе с полным водяным охлаждением радиальные каналы в сердечнике не делают. Это позволяет на 10—20% увеличить индукцию в зазоре генератора. Однако небольшую циркуляцию воздуха в генераторе необходимо предусмотреть. Нужно иметь также небольшие воздухоохладители, чтобы удалить из внутреннего пространства генератора потери на трение вращающихся частей об воздух и часть магнитных потерь сердечника, нагревающих воздух.

При смешанной системе охлаждения, в которой для охлаждения обмотки статора используют воду, а ротор охлаждают воздухом, целесообразно сохранить воздушное охлаждение сердечника статора. Число каналов в сердечнике в этом случае можно уменьшить, а длину пакета по условиям охлаждения стали сердечника увеличить до 7—10 см. Чтобы получить достаточное сечение для отвода воздуха, поступающего из ротора, может потребоваться большее число каналов и соответственно меньшая длина пакета сердечника.

ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

§ 2-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ГИДРОГЕНЕРАТОРУ

Наряду с номинальными данными гидрогенератора в задании на проект указывается угонная скорость и приводятся требования к маховому моменту, параметрам, системе возбуждения и охлаждения и др. Кроме того, при проектировании учитывают также требования к гидрогенератору, содержащиеся в ГОСТе 183—55 «Машины электрические» и ГОСТе 5616—50 «Гидрогенераторы».

Согласно ГОСТу 183—55 номинальные данные гидрогенератора относятся к его работе в условиях высоты до 1000 м над уровнем моря и при температуре охлаждающей среды или входящего в гидрогенератор воздуха +35°С.

Номинальные данные гидрогенератора

Номинальная кажущаяся мощность	.....	$S_{нч}$, $kва$
Номинальное линейное напряжение	.....	$U_{нл}$ в, $kв$
Номинальный коэффициент мощности при работе генератора с перевозбуждением и токе, отстающем от напряжения	.....	$\cos \varphi_{нч}$
Число фаз	.....	m (обычно $m=3$)
Сопряжение фаз (обычно звезда, так как при соединении треугольником ток, наведенный в его контуре третьей гармоникой поля поперечной намагничивающей силы (н. с.) якоря, повышает перегрев обмотки)	.....	f , $гц$
Частота тока	.....	$n_{нч}$, $об/мин$
Скорость вращения	.....

Угонная скорость вращения. Существенное влияние на размеры и конструкцию гидрогенератора оказывает заданная угонная скорость вращения турбины $n_{уг}$, которую гидрогенератор должен выдерживать без вредных последствий в течение двух минут (ГОСТ 5616—50). Кратность угонной скорости вращения $k_{уг} = \frac{n_{уг}}{n_{нч}}$ зависит от типа турбины ($k_{уг} = 1,8$ для ков-

шей турбины, $k_{yt} = 1,6-2,2$ для радиально-осевой турбины, $k_{yt} = 2,3-3,5$ для поворотно-лопастной турбины). Если тип турбины не указан, k_{yt} , согласно ГОСТу 5616—50, принимают равным 1,8.

Маховой момент вращающихся частей гидротурбины выбирают исходя из требований к его динамической устойчивости и повышению скорости вращения при полном сбросе номинальной нагрузки. Если необходимый маховой момент в задании на проект не указан, его можно ориентировочно определить по рекомендуемым значениям постоянной инерции T_J .

$$CD^2 = \frac{T_J S_H}{\pi^2} \left(\frac{60}{n_H} \right)^2, T \cdot M^2, \quad (2-1)$$

где S_H — в кв.а, n_H — в об/м.

При $S_H = 1000-10000$ кв.а

$$T_J = 3-5 \text{ сек};$$

при $S_H > 10000$ кв.а

$$T_J = 5-8 \text{ сек}.$$

Кроме того, для расчета требуемого махового момента принимают формулы:

при $n \leq 300$ об/м

$$CD^2 \approx (3800 - 6n_H) \frac{S_H \cos \varphi_H}{n_H^2}, T \cdot M^2, \quad (2-2)$$

при $n > 300$ об/м

$$CD^2 \approx 1850 \frac{S_H \cos \varphi_H}{n_H^2}, T \cdot M^2.$$

Требуемый маховой момент учитывают при выборе главных размеров (§ 2-2).

Параметры гидрогенератора

В задании на проект указывают необходимые для нормальной эксплуатации гидрогенератора в электрической системе параметры обмотки статора. Исходя из требуемого предела статической устойчивости и режима работы на открытую линию передачи задают индуктивное сопротивление по продольной оси x_d' (или ОКЗ). Для обеспечения необходимого предела динамической устойчивости генератора требуются определенные значения x_d' и x_d'' . Чем длиннее линия передачи, через которую гидроэлектростанция присоединяется к системе, и чем больше время отключения коротких замыканий, тем меньше индуктивные сопротивления в установившемся и переходном режиме должен иметь генератор. Однако уменьшение индуктивных сопротивлений удорожает генератор и может потребовать увеличения его размеров.

Для увеличения статической и динамической устойчивости применяют быстродействующие регуляторы возбуждения, для повышения динамической устойчивости увеличивают скорость нарастания и потолок возбуждения, уменьшают время отключения короткого замыкания, используют электрическое и механическое торможение ротора генератора.

Если генератор используют при несимметричной нагрузке, в задании указывают степень несимметрии в виде отношения тока обратной последовательности к номинальному току $I_{2*} = \frac{I_2}{I_H}$ (обычно не более 10—15%) и допустимое искажение симметрии напряжений, характеризуемое отношением напряжения обратной последовательности к номинальному напряжению $U_{2*} = \frac{U_2}{U_H}$ (это отношение не должно превышать 0,02—0,03).

Для удержания несимметрии напряжений в указанных пределах индуктивное сопротивление обратной последовательности генератора выбирают тем меньшим, чем больше заданная несимметрия токов.

Если индуктивное сопротивление не задано, его можно ориентировочно определить по формуле

$$x_{2*} = \frac{U_{2*}}{I_{2*}} \approx \frac{0,02-0,03}{I_{2*}}.$$

Уменьшение сопротивления x_2 достигается путем устройства в полюсных наконечниках генератора полной усложнительной обмотки с достаточно малым рассеянием. Стержни обмотки изготовляют из меди, а их сечение выбирают из условия получения допустимого перегрева демпферной обмотки и других частей генератора.

С целью уменьшения динамических перенапряжений при двухфазных коротких замыканиях гидрогенераторов, работающих на длинные линии электропередачи, необходимо, чтобы отношение сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной осям генератора было близким к единице [30]

$$\frac{x_d''}{x_d'} \approx 1.$$

Это условие выполняемо в гидрогенераторах с полной демпферной обмоткой.

Система возбуждения гидрогенератора

Согласно ГОСТу 5616—50, возбуждение гидрогенератора производится от возбудителя, соединенного непосредственно с валом гидрогенератора (обычно генератора постоянного тока с параллельным возбуждением). Возбудитель без применения реостатов

в цепи ротора гидрогенератора позволяет обеспечить возбуждение генератора в номинальном режиме, в режимах возможных отклонений от номинального режима, в режиме холостого хода с номинальным напряжением и в режиме работы на открытую линию передачи (емкостную нагрузку).

Для повышения динамической устойчивости генератора в аварийных режимах напряжение возбuditеля в случае необходимости надо быстро увеличивать (форсировать).

Средняя скорость нарастания напряжения возбuditеля гидрогенератора при форсировании возбуждения характеризуется наклоном прямой Ob , спрямляющей кривую изменения напряжения от номинального значения

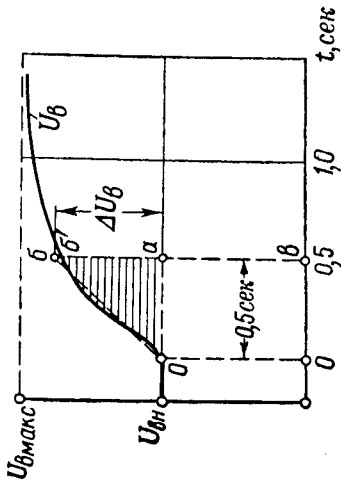


Рис. 2-1. Определение средней скорости подъема напряжения возбuditеля

Предельное напряжение возбuditеля (потолок) $U_{вмакс}$ (рис. 2-1) при форсировании возбуждения гидрогенератора составляет не менее 1,8 номинального напряжения на кольцах обмотки возбуждения.

При форсировании возбуждения возбuditель допускает двухкратный (по отношению к номинальному току возбуждения) ток в течение не менее чем 50 сек.

По ГОСТу 5616—50 допускается также применение более сложных систем возбуждения, например системы с вспомогательным синхронным генератором на валу главного гидрогенератора и преобразованием переменного тока этого генератора в постоянный при помощи электромашинного агрегата, ионного преобразователя или системы ионного самовозбуждения [31].

Форма кривой напряжения (по ГОСТу 183—55)

Форма кривой напряжения генератора характеризуется коэффициентом искажения синусоидальности, под которым понимают выраженное в процентах отношение квадратов корня из сумм квадратов амплитуд трех наибольших гармонических составляющих кривой напряжения к амплитуде ее основной гармонической.

Для гидрогенератора мощностью до 1000 *кв*а включительно этот коэффициент при холостом ходе и номинальном напряжении не превышает 10%, при большей мощности — 5%.

Это требование к форме кривой напряжения учитывают в регламентах по выбору числа пазов на полюс и фазу q , сокращения шага обмотки, формы поверхности полюсного наконечника и размеров демпферной обмотки.

Кратковременные перегрузки по току (по ГОСТу 183—55 и 5616—50)

Гидрогенератор должен без повреждений и остаточных деформаций выдерживать в нагретом состоянии следующие перегрузки по току: 1,5-кратный номинальный ток в течение 2 *мин*; ударный ток короткого замыкания из режима холостого хода с напряжением 105% от номинального.

Ударным током короткого замыкания называют наибольшее возможное при данном возбуждении синхронной машины мгновенное значение тока якоря, которое получается при внезапном коротком замыкании на всех ее линейных зажимах.

Требуемые перегрузки по току учитывают при выборе допустимой температуры для применяемой изоляции, при расчете крепления лобовых частей обмотки и выборе сверхпереходного индуктивного сопротивления якоря x'_d , от которого зависит ударный ток короткого замыкания.

Отклонения от номинального режима работы (по ГОСТу 5616—50)

При изменении напряжения в пределах $\pm 5\%$ от номинальных значений гидрогенераторы развивают номинальную кажущуюся мощность при номинальном коэффициенте мощности. При повышении напряжения до 110% от номинального гидрогенераторы допускают длительную работу. Эти требования учтены в регламентах к выбору магнитных индукций в стали гидрогенератора в номинальном режиме. Эти индукции выбирают так, что при напряжении 110% и несколько сниженном токе можно сохранить ток возбуждения номинальным.

Кроме того, для выполнения этих требований необходимо иметь небольшой запас в перегреве частей гидрогенератора в номинальном режиме ($5-10^{\circ}\text{C}$).

Конструкция гидрогенератора (по ГОСТу 183—55 и 5616—50)

Гидрогенераторы и их возбuditели предназначены для работы в закрытом помещении.

Для изоляции обмоток статора и ротора гидрогенераторов мощностью 1000 *кв*а и больше, а также гидрогенераторов напряжением 6300 *в* и выше, независимо от мощности, применяют изолирующие материалы класса В (для статора компаундированные изолирующие материалы класса В). Допустимые перегревы частей генератора при такой изоляции указаны в § 5-2 (см. ГОСТ 183—55).

Гидрогенераторы мощностью до 4000 *кв*а могут изготавливаться с разомкнутой системой вентиляции, гидрогенераторы большей мощности — с замкнутой системой самовентиляции и охлаждением воздуха водяными воздухоохладителями.

Гидрогенераторы с мощностью свыше 5000 *кв*а имеют не менее шести выведенных наружу концов обмотки статора.

Во всех гидрогенераторах предусматривают торможение их вращающихся частей. Торможение вертикальных гидрогенераторов мощностью 1000 *кв*а и выше производят воздушной тормозной системой. Тормозная система обеспечивает непрерывное торможение гидрогенератора при его останове после того, как прекращен доступ воды в турбину, генератор отключен от сети и его скорость снизилась до 35% номинальной.

Гидрогенератор мощностью 1700 *кв*а и выше имеет установленный на его валу электрический синхронный генератор с постоянными магнитами, предназначенный для питания электродвигателя регулятора гидравлической турбины.

Подпятники и подшипники вертикальных генераторов, если они установлены на верхней крестовине, и подшипники горизонтальных гидрогенераторов (во избежание появления «подшипниковых токов») электрически изолируют от статора (или фундамента) и маслопроводов. Сопротивление этой изоляции, измеренное мегомметром 500 или 1000 *в*, не менее 0,3 *Мом*.

Смазка подпятников и направляющих подшипников осуществляется без циркуляции масла вне его масляных баков. Температура неподвижного диска или сегментов подпятника и вкладышей или сегментов направляющих подшипников не превышает при номинальной скорости вращения +70° С. Температура подшипников горизонтальных гидрогенераторов, согласно ГОСТу 183—55, не превышает +80° С.

Внутри гидрогенераторов мощностью свыше 1700 *кв*а в зоне лобовых частей обмотки статора устанавливают трубы, предназначенные для тушения пожара водой в случае его возникновения внутри гидрогенератора. Концы этих труб выводят наружу для присоединения к внешним трубопроводам.

Водяные охладители гидрогенератора обеспечивают номинальную нагрузку гидрогенератора при температуре поступающей в воздухоохладители воды +25° С.

§ 2-2. ЗАВИСИМОСТЬ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРА ОТ РАСЧЕТНОЙ МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Главными размерами активных частей гидрогенератора называют внутренних диаметр сердечника статора и его расчетную длину l_0 , мало отличающуюся от длины l_1 (рис. 2-2).

Главные размеры гидрогенератора выбирают так, что генератор удовлетворяет требованиям, сформулированным в задании на проектирование, а также стандартам по электрическим машинам (ГОСТ 183—55. Электрические машины; ГОСТ 5616—50. Генераторы электрические гидротурбинные (гидрогенераторы). Технические условия).

Главные размеры гидрогенератора зависят в основном от расчетной мощности машины S_p и скорости вращения, а также от кратности угонной скорости вращения $k_{уг} = \frac{n_{уг}}{n_H}$, требуемого минимального махового момента ротора CD^2 и переходного индуктивного сопротивления по продольной оси x_d .

Расчетная мощность гидрогенератора

$$S_p = 3E_{\delta H} I_H 10^{-3}, \text{ кв}а, \quad (2-3)$$

где $E_{\delta H} = k_E U_H$ — э. д. с., индуктированная в фазе обмотки статора магнитным потоком взаимоиндукции при номинальной нагрузке Φ_H ,

$$I_H = \frac{S_H 10^3}{3U_H} \text{ — номинальный фазный ток.}$$

В номинальном режиме работы гидрогенератора э. д. с. больше напряжения на зажимах машины.

Коэффициент $k_E = \frac{E_{\delta H}}{U_H}$, как это следует из диаграммы напряжений генератора, зависит от индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора x_c^* и заданного коэффициента мощности

$$k_E = \frac{E_{\delta H}}{U_H} = \sqrt{1 + x_c^* (2 \sin \varphi_H + x_c^*)}. \quad (2-4)$$

При $\cos \varphi_H = 0,8$ ($\sin \varphi_H = 0,6$) и среднем значении $x_c^* = 0,125$ коэффициент $k_E = 1,08$. При других номинальных значениях коэффициента мощности коэффициент k_E можно рассчитать по уравнению (2-4) при $x_c^* \approx 0,125$.

Если задано переходное индуктивное сопротивление x_d^* , то в уравнение (2-4) можно подставить приближенное значение

$$x_c^* = 0,42 x_d^*.$$

Э. д. с. $E_{\delta H}$ можно выразить через максимальную индукцию в воздушном зазоре $B_{\delta H}$ (*эс*), полюсное деление τ (*см*), расчетную

длину l_{δ} (см), число последовательных витков фазы ω и частоту $f = \frac{p\pi}{60}$.

$$E_{\delta n} = 4k_B f \omega k_0 \alpha_{\delta} B_{\delta n} l_{\delta} \tau 10^{-8}, \text{ в,} \quad (2-5)$$

где $k_0 = k_p k_u$ — обмоточный коэффициент, равный произведению коэффициентов распределения и укорочения;

$\alpha_{\delta} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{он}}}$ — отношение средней индукции в зазоре к максимальной;

k_B — коэффициент формы кривой поля.

Если теперь выразить э. д. с. $E_{\delta n}$ в уравнении (2-3) по уравнению (2-5) и учесть, что линейная нагрузка статора

$$A = \frac{6\omega l_{\text{II}}}{\pi \cdot D}, \text{ а/см,} \quad (2-6)$$

то можно установить связь между главными размерами активных частей гидрогенератора, мощностью и скоростью вращения генератора:

$$\frac{D^2 l_{\delta} n}{S_L} = 6,1 \cdot 10^{11} = k_0 k_B \alpha_{\delta} A B_{\delta n} = C_A. \quad (2-7)$$

Величину C_A называют машинной постоянной Арнольда, поскольку при постоянных электромагнитных нагрузках A и $B_{\delta n}$ она не изменяется.

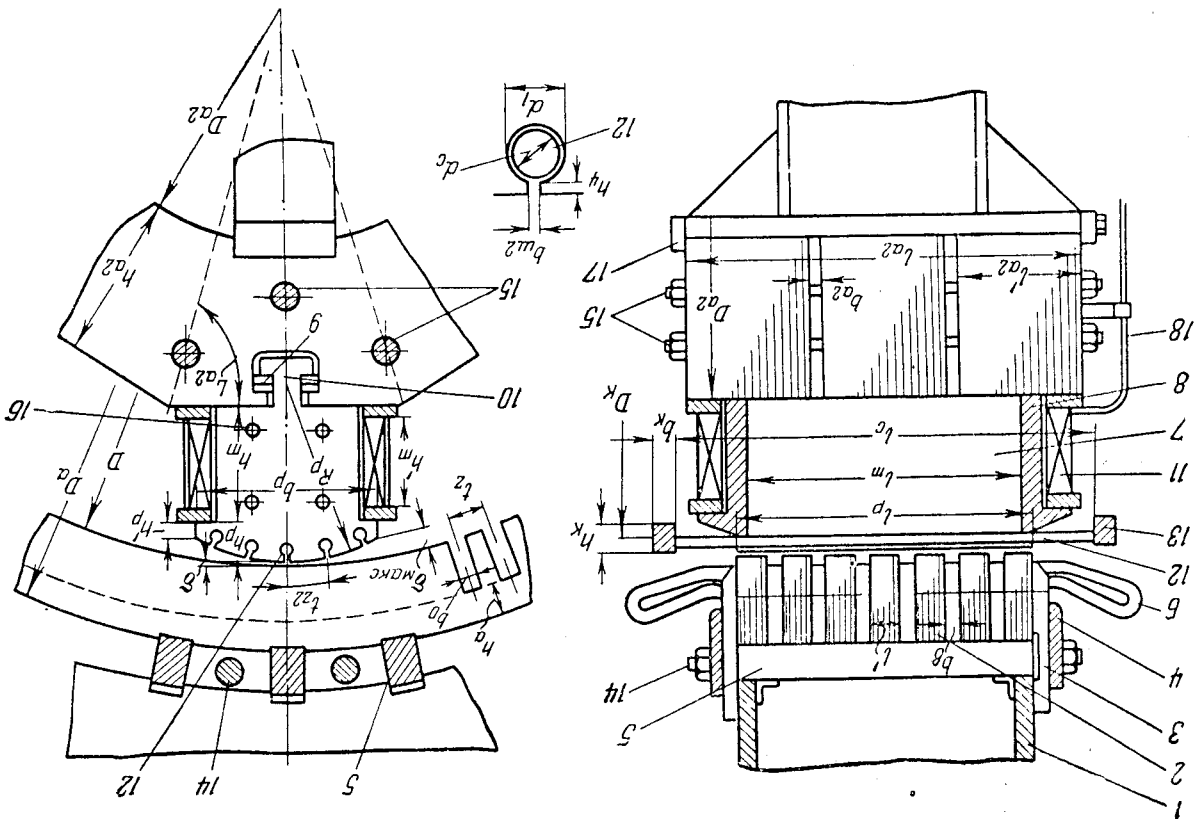
Однако допустимые электромагнитные нагрузки зависят от способа охлаждения машины, размеров машины (от полюсного деления) и от заданных параметров (от переходного сопротивления по продольной оси x_d^*).

Как видно из табл. 2-1, в которой дана зависимость A и $B_{\delta n}$ от величины полюсного деления τ для гидрогенераторов с поверхностным воздушным охлаждением, с ростом полюсного деления индукцию и линейную нагрузку можно увеличить при сохранении температур перегрева активных частей на допустимом уровне. Эта возможность появляется благодаря росту окружающей скорости ротора и скорости движения воздуха, охлаждающего активные части гидрогенератора (с увеличением последней увеличивается коэффициент теплопередачи от охлаждаемых поверхностей к воздуху).

Для того чтобы однозначно определить длину l_{δ} и диаметр D , уравнение (2-7) можно решить совместно с эмпирическим уравнением для махового момента вращающихся частей генератора GD^2 :

$$GD^2 = \beta D^3 \cdot l_{\delta}, \text{ Тм}^2, \quad (2-8)$$

Рис. 2-2. Размеры активных частей гидрогенератора:
1 — станина (корпус) статора; 2 — пакет сердечника статора; 3 — пальцы нажимной пружины; 4 — нажимные плиты; 5 — брусок с хвостом для насадки сердечника; 6 — обмотка статора; 7 — сердечник полюса; 8 — нажимная пружина полюса; 9 — встречные клинья; 10 — хвост полюса (Z-образный); 11 — катушка обмотки возбуждения; 12 — стержень успокоительной (демпферной) обмотки; 13 — короткозамыкающий сегмент (на кольцо) успокоительной обмотки; 14, 15, 16 — шпильки, стягивающие сердечник статора, ярма, ротора и полюсов; 17 — остаток ротора; 18 — выводы обмотки возбуждения к контактным кольцам



где D и l_6 — в м;

$\beta = 4,5$ при $p \leq 12(14)$ (обод ротора насажен на вал);

$\beta = 5,2$ при $p > 12(14)$ (обод ротора насажен на остов).

Если D и l_6 удовлетворяют уравнению (2-8), то требуемый маховой момент GD^2 можно получить без дополнительного утяжеления ротора при нормальных напряжениях в ободе.

Таблица 2-1

τ , см	20	30	40	50	60	70	80
A , а/см	450	500	540	575	610	650	670
B_{6H} , гс	7 600	8000	8250	8500	8600	8700	8800
$C_A \cdot 10^4$	27,5	23,6	20,3	18,5	16,7	15,5	14,9
$\alpha = \frac{b_p}{\tau}$	0,66	0,7	0,69—0,73			0,72—0,75	
$k_B \alpha_6$	0,705		0,733			0,755	

Примечания: 1. Рекомендуемые в таблице значения A , B_{6H} , C_A позволяют получить $x_d^* \approx 0,30$.

2. Если задано иное значение x_d^* , то линейная нагрузка A и машинная постоянная C_A изменяются пропорционально отношению $\sqrt{\frac{x_d^*}{0,3}}$.

Решая уравнения (2-7) и (2-8) относительно диаметра D , найдем:

$$D = 465 \sqrt[3]{\left(\frac{10^4 n}{C_A \beta}\right)^2 \left(\frac{10GD^2 p}{S_p}\right)^2}, \text{ см.}$$

Для определения диаметра необходимо рассчитать S_p по уравнению (2-3) с учетом уравнения (2-4), маховой момент GD^2 по табл. 2-1, подставить скорость вращения n и задаться при помощи табл. 2-1 и 2-2 машинной постоянной C_A .

Полусное деление, соответствующее этому диаметру,

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \text{ см,} \quad (2-10)$$

может незначительно отличаться от того, которым задаются по табл. 2-2.

Если полюсному делению по уравнению (2-10) соответствует величина C_A , заметно отличающаяся от той, которой задались по табл. 2-1, значение диаметра D и полюсного деления τ следует еще раз уточнить, подставив в уравнение (2-9) уточненную по табл. 2-1 машинную постоянную C_A .

При выбранных диаметре D и полюсном делении τ угонная окружная скорость на наружной поверхности ротора $v_{уг}$ не должна превышать предельных значений v_d , при которых механические напряжения в ободе и хвостах полюсного генератора, работающих в допустимых пределах. В синхронных гидрогенераторах, работающих при частоте 50 гц, номинальная окружная скорость в м/сек численно равна полюсному делению в см, поэтому

$$v_{уг} = k_{уг} v_n \text{ (м/сек)} = k_{уг} \tau \text{ (см)} \leq v_d,$$

где $k_{уг} = \frac{n_{уг}}{n_n}$ — кратность угонной скорости вращения, заданная в технических условиях.

Следовательно, выбранное значение

$$\tau \leq \frac{v_d}{k_{уг}}, \quad (2-11)$$

где $v_d = 105—115$ м/сек при $n = 57,7—100$ об/мин;

$v_d = 110—120$ м/сек при $n = 100—187$ об/мин;

$v_d = 120—130$ м/сек при $n = 185—500$ об/мин.

Если окажется, что при выбранном полюсном делении $v_{уг} > v_{доп}$, необходимо уменьшить полюсное деление до значения

$$\tau = \frac{v_{доп}}{k_{уг}}.$$

Требуемую величину GD^2 можно получить в этом случае путем искусственного утяжеления обода ротора (см. § 4-6).

Внутренний диаметр сердечника статора уточняют по выбранному полюсному делению:

$$D = \frac{2pr}{\pi}.$$

Для определения расчетной длины гидрогенератора по уравнению (2-7) необходимо по табл. 2-1 задаться линейной нагрузкой A , индукцией B_{6H} и произведением $\alpha_6 k_B$:

$$l_6 = \frac{6,1 \cdot 10^{11} S_p}{k_B \alpha_6 k_B A B_{6H} n D^2}, \text{ см.} \quad (2-12)$$

Полагая, что шаг обмотки y составляет около 0,83 τ , обмоточный коэффициент k_0 можно предварительно принять равным 0,92.

Выбор основных размеров гидрогенераторов с внутренним охлаждением обмоток

При полном водяном охлаждении обмоток и сердечника линейную нагрузку A можно увеличить в 2,0—2,3 раза, индукцию в зазоре $B_{\delta H}$ — в 1,2 раза по сравнению со значениями, представленными в табл. 2-1.

При смешанном внутреннем охлаждении (водяном охлаждении обмотки статора и воздушном внутреннем охлаждении обмотки ротора и сердечника статора) линейную нагрузку можно увеличить в 1,8—2,0 раза, индукцию — в 1,1 раза по сравнению со значениями табл. 2-1.

Таблица 2-2
Ориентировочный выбор полюсного деления

$\frac{S_H}{2p}$, кВа	100	300	800	1600	3200	5500
τ , см	30	40	50	60	70	80

Машинную постоянную C_A определяют по уравнению (2-7). Допустимые при данном полюсном делении мощности на один полюс в табл. 2-2 можно увеличить в первом случае в 2,4—2,8 раза, во втором — в 2—2,2 раза.

Коэффициент k_E определяют по заданному значению x'_d и рекомандованному соотношению между x'_d и x_σ (x'_d не должно быть более 0,45—0,50).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

§ 3-1. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ И ЧИСЛА ПАЗОВ СТАТОРА

В гидрогенераторах почти всегда применяют два типа обмоток статора: двухслойные стержневые волновые обмотки с двумя эффективными проводниками в пазу (рис. 3-1, а) и двухслойные катушечные петлевые обмотки с числом эффективных проводков в пазу более двух (рис. 3-1, б).

В гидрогенераторах с фазным током $I_H \geq (900 \div 1000) a$ обычно при напряжениях $U_{нл} \geq 6000$ в следует применять двухслойные стержневые волновые обмотки, имеющие весьма надежную витковую изоляцию.

Двухслойные катушечные обмотки применяют при меньших фазных токах.

В гидрогенераторах с водяным охлаждением для уменьшения числа вводов воды могут применяться однослойные стержневые волновые обмотки с одним стержнем в пазу.

Для улучшения формы кривой напряжения эти обмотки выполняют с дробным числом пазов на полюс и фазу q .

Расчет обмотки можно начать с ориентировочного определения числа последовательных витков фазы:

$$\omega = \frac{k_E U_H 10^{-8}}{4k_0 [\alpha_\delta k_B] \tau l_\delta B_{\delta H}}, \quad (3-1)$$

где $k_0 = 0,92$; $[\alpha_\delta k_B]$ и $B_{\delta H}$ выбирают по табл. 2-1, k_E рассчитывают по уравнению (2-4) или принимают равным 1,08.

В дальнейшем, при выборе благоприятного числа пазов статора z число витков ω можно изменить.

Число пазов z связано с одной стороны, с числами витков ω , эффективных проводков в пазу u_H и параллельных ветвей и, с другой стороны, с числами пазов на полюс и фазу q и полюсов p .

$$z = 6 \left(\frac{a}{u_H} \right) \omega = 6pq. \quad (3-2)$$

Выбор величин a , u_H и q необходимо взаимно увязывать.

Выбор тока паза

I _п при различных значениях U _{пл} , кв	Т, сж			
	20	30	40	50
3, 15	1200—1900	1350—2100	—	—
6, 3	1600—2300	1750—2500	1900—2700	2000—3000
10, 5	—	2500—3000	2700—3300	2900—3500
13, 8	—	—	3100—3600	3300—3900
15, 7	—	—	3400—3900	3600—4150

I _п при различных значениях U _{пл} , кв	Т, сж		
	60	70	80
3, 15	—	—	—
6, 3	2100—3100	—	—
10, 5	3100—3700	3300—3900	3400—4000
13, 8	3500—4100	3800—4300	3900—4500
15, 7	3800—4400	4000—4700	4150—4800

При фазном токе $I_H = (900 \div 1000) a$ применяют стержневую обмотку с $u_{\text{п}} = 2$, при меньших токах — катушечную петлевою обмотку с четным числом эффективных проводников в пазу $u_{\text{п}} > 2$. Число параллельных ветвей a необходимо увязывать с выбранным знаменателем числа пазов на полюс и фазу d [см. уравнение (3-6)].

Кроме того, следует иметь в виду, что в гидрогенераторе с катушечной обмоткой эффективный провод может состоять из одного, двух и четырех элементарных проводников (рис. 3-1, б, в) с сечением до 15 мм^2 . При средней плотности тока $3-3,5 \text{ а/мм}^2$ ток эффективного провода катушечной обмотки равен примерно 50, 100 или 200 а.

Поэтому число параллельных ветвей катушечной обмотки

$$a \approx \frac{I_H}{50 \text{ или } 100 \text{ или } 200} \quad (3-4)$$

Выбор числа пазов на полюс и фазу q

По уравнению (3-2) число пазов на полюс и фазу равно:

$$\left(\frac{I_H}{I_{\text{п мин}}} \right) \frac{\omega}{p} > q = \left(\frac{a}{u_{\text{п}}} \right) \frac{\omega}{p} = \left(\frac{I_H}{I_{\text{п}}} \right) \frac{\omega}{p} > \left(\frac{I_H}{I_{\text{п макс}}} \right) \frac{\omega}{p} \quad (3-5)$$

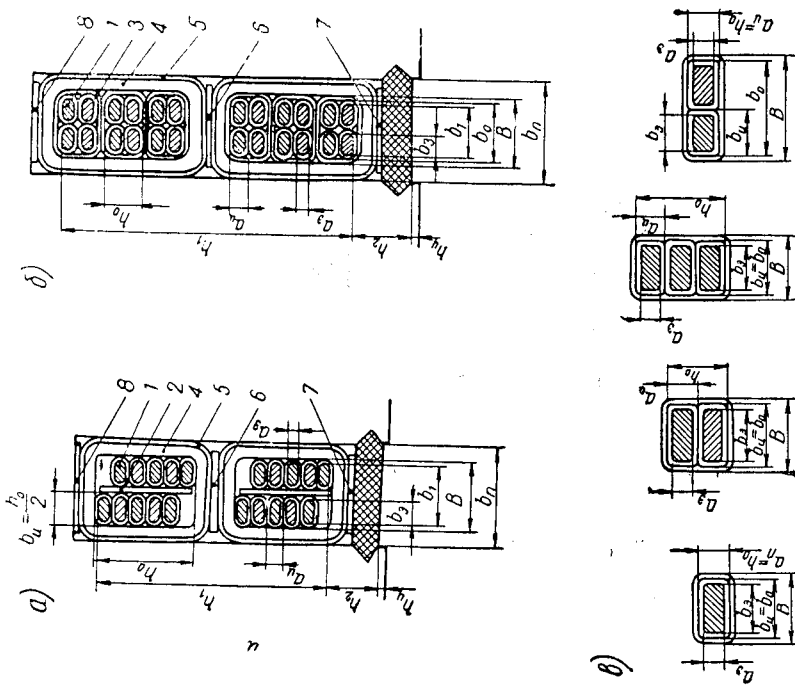


Рис. 3-1. Разрезы пазов обмотки статора гидрогенератора:

а — разрез паза двухслойной стержневой волновой обмотки; б) — разрез паза двухслойной катушечной обмотки с шестью эффективными проводами в пазу; в) варианты конструкции эффективного провода обмотки по рис. 3-1, б

Выбор чисел параллельных ветвей a и эффективных проводов в пазу $u_{\text{п}}$

Отношение $\frac{u_{\text{п}}}{a}$ должно лежать в пределах

$$\frac{I_{\text{п макс}}}{I_H} \geq \frac{u_{\text{п}}}{a} = \frac{I_{\text{п}}}{I_H} \geq \frac{I_{\text{п мин}}}{I_H} \quad (3-3)$$

где $I_{\text{п макс}}$ и $I_{\text{п мин}}$ — максимальный и минимальный ток паза, рекомендуемые в табл. 3-1.

В гидрогенераторах с полным водяным охлаждением ток паза можно увеличить в 2,0—2,3 раза по сравнению со значениями табл. 3-1, в гидрогенераторах со смешанным внутренним охлаждением — в 1,8—2,0 раза. В отдельных случаях ток паза может достигать 12—14 тыс. ампер.

Число пазов q должно состоять из целого числа b и правильной несократимой дроби $\frac{c}{d}$

$$q = b + \frac{c}{d}.$$

Знаменатель d дроби $\frac{c}{d}$ выбирают так, что частное от деления числа полюсов $2p$ на d , численно равное максимально возможному числу параллельных ветвей обмотки $a_{\text{макс}}$, является целым числом, кратно выбранному числу параллельных ветвей a .

$$\frac{2p}{d} = a_{\text{макс}} = ka, \quad (3-6)$$

где k — целое число.

Знаменатель дроби d не должен быть кратен числу фаз

$$d \neq 3k, \quad (3-7)$$

где k — целое число.

Кроме того, при стержневой волновой обмотке сравнительно небольшая длина переемычек между обходами обмотки получается, если дробь $\frac{c}{d}$ удовлетворяет условию

$$c = \frac{kd \pm 1}{3}, \quad (3-8)$$

где $k = 1$ или 2 .

Этому условию соответствуют следующие значения $\frac{c}{d}$:

$$\begin{array}{l} 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 17, 19, \text{ и т. д.} \\ 4, 9, 13, 14, 16, 17, 18, 19, \text{ и т. д.} \end{array}$$

При знаменателе дробности d , равном $5, 7, 11, 13$ и т. д., достаточно малая общая длина переемычек получается при выполнении условия

$$c = \frac{k \cdot d \pm 1}{6}, \quad (3-9)$$

где $k = 1$ или 5 .

Этому условию соответствуют следующие дроби $\frac{c}{d}$:

$$\frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{1}{7}, \frac{2}{7}, \frac{1}{11}, \frac{2}{11}, \frac{1}{13}, \frac{2}{13}, \frac{1}{17}, \frac{2}{17}, \text{ и т. д.}$$

При катушечной обмотке условия (3-8) и (3-9) не учитывают. Невыполнение условий (3-8) и (3-9) для волновой стержневой обмотки приводит к увеличению расхода меди и к удорожанию машины.

При выборе благоприятного значения $q = b + \frac{c}{d}$, увязанного с числами эффективных проводников в пазу u_n , параллельных ветвей a и c рекомендуемым током в пазу, возможно некоторое изменение числа витков фазы. Желательно, чтобы это изменение не превышало $\pm 5\%$.

После выбора a, u_n и q число последовательных витков фазы статора w и число пазов z определяют по уравнениям (3-10) и (3-11).

$$w = \frac{qu_n p}{d}, \quad (3-10)$$

$$z = 6pq = \frac{6p}{d}(bd + c). \quad (3-11)$$

Если возможно применить несколько вариантов чисел q (а иногда и чисел a и u_n), то нужно определить z для каждого из возможных сочетаний (q, a, u_n). Окончательные значения q, a, u_n и z устанавливают при выборе сегментировки статора.

Выбор числа сегментов сердечника статора и окончательное установление обмоточных данных и главных размеров

Сердечник статора гидрогенераторов при $\tau \geq 20$ см и $p \geq 6$ имеет внешний диаметр

$$D_a \approx D + \tau > 99 \text{ см} \quad (3-12)$$

и его набирают из сегментов (см. § 1-3 и рис. 3-2, б, в).

На один сегмент приходится целое число пазовых делений z_c . Возможное число пазовых делений в сегменте

$$z_c = 7 - 13, \quad (3-13)$$

в гидрогенераторах на напряжение $U_{\text{пл}} \leq 3,15$ кв до 18-20 пазовых делений.

Число сегментов в одном слое сердечника статора также является целым:

$$\frac{z}{z_c} = k, \quad (3-14)$$

где k — целое число.

В зависимости от размеров, условий сохранения достаточной жесткости одной части и возможности перевозки по железной дороге статор может быть неразъемным ($c = 1$) или разниматься на $c = 2, 4, 6$ или 8 частей (см. табл. 3-2). При четном числе частей число пазов статора z также четное.

Число частей статора генератора

<i>D, ж</i>	До 2,5—3,0	От 2,5—3,0 до 6,5	Больше 6,5
Число частей статора	1	2, 4, 6	4, 6, 8

Стык между соседними сегментами проходит через середину паза. При четном числе пазов в сегменте (рис. 3-2, б) каждый следующий слой сегментов смещается на 1/2 сегмента, а дополнительные сегменты образуются путем разрезания основного сегмента на две одинаковые части по оси среднего паза сегмента. Поэтому при четном числе пазов в сегменте z_c число сегментов в каждой части статора $\frac{z}{z_c}$ равно или целому числу k или целому числу с половиной.

$$z = z_c k \text{ или } z_c c \left(k + \frac{1}{2} \right). \quad (3-15)$$

При нечетном числе пазов в сегменте (рис. 3-2, а) дополнительный сегмент нельзя образовать путем разрезания основного сегмента на две одинаковые части, так как в этом случае разрез пройдет по оси зубца. Обычно нечетное число пазов в сегменте принимают кратным трем. Дополнительные сегменты составляют 1/3 и 2/3 части сегмента, и каждый следующий слой смещается на 1/3 сегмента по отношению к предыдущему слою. Неодинаковые дополнительные сегменты можно полностью использовать только при целом числе сегментов в каждой из частей статора. Поэтому при нечетном числе пазов в сегменте z_c число сегментов в каждой части статора $\frac{z}{z_c}$ равно целому числу

$$z = z_c k. \quad (3-16)$$

Более сложные схемы сегментирования сердечника статора рассмотрены в [17].

Число пазов в сегменте z_c выбирают так, чтобы получить наиболее выгодный раскрой стандартных листов электротехнической стали, из которых штампуют сегменты (рис. 3-2, а).

Если большая хорда сегмента

$$H_c = D_a \sin \left(\frac{180^\circ z_c}{z} \right), \text{ см} \quad (3-17)$$

равна или меньше ширины или половины ширины листа без учета припуска на штамповку (0,5—1 см), то сегментировка может считаться удовлетворительной.

Стали марок Э42, Э43 и Э330 толщиной 0,5 мм, применяемые для сердечников крупных гидрогенераторов ($\tau \geq 20$ см, $p \geq 6$), по ГОСТу 802—58 имеют размеры: 600×1500 , 750×1500 , 860×1720 , 1000×2000 .

Поэтому большая хорда сегмента H_c должна быть равна или несколько меньше следующих значений: 37, 42, 49, 59, 74, 85 см.

Для выбора наилучшего варианта следует составить табл. 3-2а возможных вариантов чисел пазов и сегментирования статора в соответствии с условиями (3-13), (3-14), (3-15).

Таблица 3-2а

Выбор вариантов числа пазов в сегменте

z	z_1	z_2
Разложение на простые множители	$z_1 = a_{11} a_{12} a_{13}$	$z_2 = a_{21} a_{22} a_{23}$
Число частей статора по табл. 3-2	c_{11}	c_{21}
Число пазов в сегменте	z_{c11}	z_{c21}
Большая хорда сегмента	H_{c11}	H_{c21}
	c_{12}	c_{22}
	z_{c12}	z_{c22}
	H_{c12}	H_{c22}
	c_{13}	c_{23}
	z_{c13}	z_{c23}
	H_{c13}	H_{c23}
	c_{14}	c_{24}
	z_{c14}	z_{c24}
	H_{c14}	H_{c24}

Окончательно следует выбрать тот вариант z , c и z_c , в котором большая хорда сегмента наилучшим образом удовлетворяет рекомендуемым значениям H_c .

Выбранный вариант z и соответствующие ему числа пазов на полюс и фазу q и параллельных ветвей a , эффективных проводов в пазу u_p и витков фазы w [по уравнению (3-10), (3-11)] можно окончательно принять для дальнейшего расчета.

Если ни при одном из вариантов z удовлетворительный раскрой не получится, может потребоваться изменение выбранных диаметра D и длины l_d .

Шаг обмотки y , равный целому числу пазовых делений, выбирают таким образом, чтобы обмоточные коэффициенты для 5 и 7

гармоник напряжения были возможно меньшими.

$$y \approx 0,83\tau, \quad (3-18)$$

где $\tau = \frac{z}{2p}$ — полюсное деление в пазовых делениях.

Обмоточный коэффициент при установленных значениях q и y определяют по формуле

$$k_0 = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{(bd+c) \sin \frac{30^\circ}{bd+c}} \sin \frac{y}{\tau} \sin \frac{y}{\tau} 90^\circ, \quad (3-19)$$

где $bd+c$ — числитель дробного числа пазов на полюс и фазу;

$$q = \frac{bd+c}{d}.$$

Индукция в воздушном зазоре при номинальной нагрузке (во втором приближении)

$$B_{\delta n} = \frac{k_B U_n 10^8}{4k_B \alpha_\delta k_0 \tau l_0 \omega}, \quad (3-20)$$

где $k_B \cdot \alpha_\delta$ — по табл. 2-1.

Линейная нагрузка (окончательно)

$$A = \frac{6\omega I_n}{\pi D}, \quad a/\text{см}. \quad (3-21)$$

§ 3-2. Выбор размеров паза статора

Определение размеров сердечника статора начинают с выбора ширины паза b_n .

При установленном выше числе пазов статора z (§ 3-1) и зубцовом делении

$$t_z = \frac{\pi D}{z}, \quad \text{см} \quad (3-22)$$

ширина паза b_n связана с шириной зубца статора b'_z в наиболее узком месте (на диаметре D):

$$b'_z = t_z - b_n - \Delta b, \quad \text{см}, \quad (3-23)$$

где $\Delta b = 0,06$ — припуск на неточность штамповки и сборки сердечника по ширине паза.

Ширину зубца b'_z выбирают так, чтобы индукция в этом сечении B'_z не превышала 15000—19000 гс:

$$b'_z = \frac{B_{\delta n} t_z l_0}{B'_z l_m k_c} \approx 1,32 t_z \frac{B_{\delta n}}{B'_z}. \quad (3-24)$$

* Коэффициент 1,32 соответствует средней длине пакета 4,5 см при каналах шириной 1 см.

Ширину паза b_n берут тем больше, чем выше напряжение и толщина изоляции в нем. Чем уже паз, тем меньше коэффициент его заполнения медью.

С ростом ширины паза возрастают добавочные потери на поверхности полюсов и усложняется технология изготовления обмотки. Рекомендуемые пределы ширины паза приведены в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Ширина паза статора		
Линейное номинальное напряжение, U _{ли} , кВ	b _{п мин} , см	b _{п макс} , см
6,3	1,6	2,3
10,5	2,1	2,7
13,8	2,4	3,0
15,7	2,6	3,2

Ширину паза уточняют при выборе стандартной ширины проводников. Ширина паза обычно не превышает половины зубцового деления:

$$b_n = (0,40-0,5) t_z \approx 0,45 t_z. \quad (3-25)$$

После ширины паза определяют сечение эффективного проводника обмотки статора

$$s = \frac{I_n}{a\Delta}, \quad \text{мм}^2, \quad (3-26)$$

где a — число параллельных ветвей; Δ — плотность тока, а/мм².

Плотность тока Δ в гидрогенераторах с поверхностным охлаждением выбирают по линейной нагрузке A и рекомендуемому произведению плотности тока на линейную нагрузку ΔA , от которого зависит температура перегрева обмотки статора (см. табл. 3-4).

$$\Delta = \frac{(\Delta A) \pm 10\%}{A}, \quad a/\text{мм}^2. \quad (3-27)$$

Таблица 3-4
Зависимость ΔA от полюсного деления τ

τ , см	20	30	40	50	60	70	80
ΔA , а/мм ² , а/см	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2100

С ростом полюсного деления и окружной скорости ротора охлаждение гидрогенератора улучшается (увеличивается коэффициент теплопередачи от охлаждаемых поверхностей к воздуху) и произведение $\Delta \cdot A$ можно увеличить.

Таблица 3-5

Непрерывная изоляция пазовой части двухслойных катушечных и стержневых якорных обмоток машин переменного тока 3 150, 6 300, 10 500, 13 800 и 15 700 в (класса В)

Обозначение по рис. 3-1	Название изоляции, материал	Двухсторонняя толщина изоляции, мм	
		катушечная обмотка (рис. 3-1, б)	обмотка из плетеных стержней (рис. 3-1, а)
1	Провод ПДА, ПСД	—	—
2	Прокладка — миканит толщиной 0,3—0,5 мм	—	0,3—0,5
3	Витковая изоляция—микалента толщиной 0,13—0,15 мм при напряжении: 3,15 кв—1 слой 6,3 кв—1—2 слоя 10,5 кв—2 слоя 13,8 кв—2 слоя 15,7 кв—2 слоя вполнахлеста	0,6 0,6—1,2 1,2 1,2 1,2	— — — — —
4	Изоляция катушки или стержня—микалента 0,13—0,15 мм при напряжении: 3,15 кв—6 (7) слоев * 6,3 кв—9 (10) слоев 10,5 кв—14 (15) слоев 13,8 кв—17 (18) слоев 15,7 кв—19 (20) слоев	3,6 5,4 8,4 10,2 11,4	4,2 6,0 9,0 10,8 12,0
5	Железистая асбестовая лента толщиной 0,5 мм, впритык—1 слой (при 10,5; 13,8 и 15,7 кв) Киперная лента толщиной 0,3 мм один слой впритык (при 3,15 и 6,3 кв)	— 1,0	1,0 0,6
6 } 7 } 8 }	Прокладочный миканит или картон ЭВ толщиной 1,0—1,5 мм	{ 1,0—2,0 2,0—3,0 1,0—1,5	{ 1,0—2,0 2,0—3,0 1,0—1,5
	Общая толщина изоляции по высоте и ширине паза	См. табл. 3-6 и 3-7	

* Число слоев, приведенное в скобках, относится к плетеному стержню.

Эффективный проводник для уменьшения добавочных потерь из-за вытеснения тока надо разбить на элементарные изолированные проводники с высотой a_0 не более 0,25 см (при 50 гц).

Суммарная ширина изолированных проводников по ширине паза (см. рис. 3-1, табл. 3-5)

$$b_0 = b_{\text{п}} - 2\delta_{\text{л}}, \quad (3-28)$$

где $2\delta_{\text{л}}$ — полная толщина изоляции по ширине паза без учета изоляции элементарных проводников.

Таблица 3-6

Полная толщина непрерывной изоляции двухслойных стержневых обмоток по ширине $2\delta_{\text{л}}$ и высоте паза $\delta_{\text{н}}$ (к табл. 3-5, рис. 3-1, а)*

Напряжение, в	$2\delta_{\text{л}}, \text{ мм}$	$\delta_{\text{н}}, \text{ мм}$
3150	5,4	15,1
6300	7,4	18,9
10 500	10,8	25,9
13 800	12,6	29,0
15 700	13,8	31,4

* С учетом разбухания, зазора на укладку и перекрытия слоев.

Полная толщина изоляции по ширине паза зависит от заданного линейного напряжения гидрогенератора, типа изоляции и конструкции обмотки.

Для стержневой волновой двухслойной обмотки по рис. 3-1, а с компаундированной изоляцией класса В, применяемой в гидрогенераторах и допускающей температуру нагрева 105°, толщину изоляции можно взять по табл. 3-6; для катушечной петлевой двухслойной обмотки с той же изоляцией — из табл. 3-7. Более полное представление о конструкции изоляции этих обмоток дает табл. 3-5, составленная применительно к рис. 3-1.

В случае стержневой двухслойной обмотки (рис. 3-1, а) элементарные проводники в пазовой части переплетаются (транспонируются) между собой для избежания циркуляционных токов внутри стержня.

При осуществлении транспозиции число проводников в эффективном проводе c_3 четное, по ширине паза располагается два проводника ($n_3 = 2$), а по высоте паза предусматривают добавочное место, равное толщине изолированного элементарного проводника. Два вертикальных ряда элементарных проводников отделяют прокладкой 2 (рис. 3-1, а).

Таблица 3-7

Полная толщина непрерывной изоляции двухслойных катушечных обмоток по ширине $2\delta_{II}$ и высоте паза δ_h (к табл. 3-5, рис. 3-1, б, в)*

Напряже- ние, в	$2\delta_{II}$	Полная толщина изоляции по высоте паза δ_h без клина при числе активных проводов в пазу, мм								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
3150	5,1	16,3	17,5	18,7	19,9	21,1	22,3	23,5	24,7	25,9
6300	7,5	22,3	24,7	27,1	29,5	31,9	34,3	36,7	39,1	41,5
10 500	10,9	29,5	31,9	34,3	36,7	39,1	41,5	43,9	—	—
13 800	12,7	32,6	34,9	37,3	39,7	42,1	44,3	46,7	—	—
15 700	13,9	35,0	37,3	39,7	42,1	44,5	—	—	—	—

* С учетом разбухания, зазора на укладку и перекрытия слоев.

Ширину элементарного проводника b_0 (без учета толщины его изоляции) выбирают по табл. П1-1 (приложение 1) так, что по ширине паза размещаются два проводника ($n_0 = 2$).

$$b_{II} = \frac{b_0}{2}, \quad (3-29)$$

где $b_{II} = b_0 + \Delta_{II}$ — ширина изолированного элементарного проводника;

Δ_{II} — двухсторонняя толщина изоляции проводника марки ПДА или ПСД по табл. П1-3 (приложение 1).

После выбора стандартной ширины проводника b_0 ширину паза уточняют по формуле:

$$b_{II} = 2b_{II} + 2\delta_{II}.$$

Высоту элементарного проводника по табл. П1-1 не рекомендуется брать больше 0,25 см. При этом сечение элементарного проводника s_0 не превышает 10—16 (20) мм².

$$a_0 b_0 \leq 10 - 16 (20), \text{ мм}^2. \quad (3-30)$$

Сечение элементарного проводника s_0 с учетом закругления углов уточняют по табл. П1-1.

Поскольку число элементарных проводников в стержне c_0 должно быть четным

$$c_0 = \frac{s}{s_0}, \quad (3-31)$$

определенное выше сечение эффективного провода s и плотность тока Δ также уточняют.

Окончательно

$$s = c_0 s_0;$$

$$\Delta = \frac{I_{II}}{as}.$$

Суммарная высота изолированных элементарных проводников одного стержня

$$h_0 = a_{II} \left(\frac{c_0}{2} + 1 \right). \quad (3-32)$$

Высота паза или зубца статора

$$h_{II} = h_z = 2h_0 + \delta_h + \Delta h + h_{кл}, \quad (3-33)$$

где δ_h — суммарная толщина изоляции по высоте паза по табл. 3-6;

$\Delta h = 0,04$ см — припуск на неточность штамповки и сборки сердечника по высоте паза;

$h_{кл} = 0,3b_{II}$ — высота клина.

В случае петлевой катушечной обмотки число элементарных проводников в эффективном проводе $c_0 = 1,2$ (3) 4 выбирают по рис. 3-1, б, в так, что сечение одного элементарного провода

$$s_0 = \frac{s}{c_0} \leq 10 - 16 (20), \text{ мм}^2,$$

высота провода

$$a_0 \leq 2,5 \text{ мм},$$

ширина провода

$$b_0 = \frac{b_0}{n_0} - \Delta_{II} \leq 7 \text{ мм},$$

где $n_0 = 1$ или 2 — количество элементарных проводов по ширине паза;

Δ_{II} — двухсторонняя толщина изоляции элементарного провода по табл. П1-3.

Размеры провода a_0 , b_0 и сечение s_0 берут по табл. П1-1, сечение эффективного провода, плотность тока и ширину паза при этом корректируют.

$$s = c_0 s_0,$$

$$\Delta = \frac{I_{II}}{as},$$

$$b_{II} = n_0 (b_0 + \Delta_{II}) + \Delta b + 2\delta_{II}.$$

Суммарная высота изолированных элементарных проводников эффективного провода

$$h_0 = \frac{c_0}{n_0} a_{II}, \quad (3-34)$$

где $a_n = a_0 + \Delta_n$ — высота изолированного элементарного провода;

$\frac{c_3}{n_s}$ — число элементарных проводников по высоте эффективного провода.

Высота паза или зубца статора

$$h_{\text{п}} = h_z = u_n h_0 + \delta_h + \Delta h + h_{\text{кл.}} \quad (3-35)$$

Как при стержневой, так и при катушечной обмотке высота паза

$$h_{\text{п}} = (4,5 \div 7,5) b_{\text{п}}$$

Окончательные размеры паза устанавливают после вычерчивания масштабного эскиза паза (М1 : 1 или 2 : 1), составления его подробной спецификации при помощи табл. 3-5 и проверки (для генераторов с поверхностным охлаждением) среднего перепада температуры в изоляции паза

$$\Theta_{\text{и}} = \frac{0,1194 \Delta t_z \delta_{\text{и}} k_f}{1000 (h_{\text{п}} - h_{\text{кл}}) \lambda} < 30^\circ \text{C}, \quad (3-36)$$

где A — линейная нагрузка, $a/\text{см}$;

Δ — плотность тока, $a/\text{мм}^2$;

$t_z, h_{\text{п}}, h_{\text{кл}}$ — размеры паза, см ;

$\delta_{\text{и}}$ — односторонняя толщина пазовой изоляции, см ;

$\lambda = 0,0016$ — теплопроводность изоляции;

$k_f \approx 1,2$ — коэффициент увеличения потерь в обмотке из-за вытеснения тока.

Выбор размеров паза и проводов при водяном охлаждении обмотки статора

Ширину паза выбирают так, как при поверхностном охлаждении. Высоту паза предварительно определяют, исходя из заданного переходного индуктивного сопротивления x'_d . Полагая $x'_\sigma \approx 0,42 x'_d$, можно найти допустимую высоту паза по уравнению (3-39):

$$h_{\text{п}} \ll b_{\text{п}q} \left[\frac{x'_\sigma B_{\delta \text{и}}}{0,7 k_{EA}} - \frac{v}{t_0} \right].$$

Задавись размерами клина по (3-3) и суммарной толщиной изоляции по высоте δ_h и ширине $2\delta_{\text{и}}$ паза, можно найти суммарную высоту и ширину элементарных изолированных проводников одного стержня в случае применения двухслойной стержневой обмотки [уравнения (3-28) и (3-30)]

$$h_0 = 0,5 (h_{\text{п}} - h_{\text{кл}} - \delta_h - \Delta h);$$

$$b_0 = b_{\text{п}} - 2\delta_{\text{и}}.$$

В случае применения однослойной стержневой обмотки высоту стержня определяют по формуле

$$h_0 = h_{\text{п}} - h_{\text{кл}} - \Delta h - \delta_h + 2\delta_{\text{и}}.$$

Конструкция стержня, охлаждаемого водой, показана на рис. 1-60. При плотности тока в обмотке Δ от 4,5 до 6,0 $a/\text{мм}^2$ на каждый полый элементарный проводник рекомендуется взять два сплошных: при $\Delta = 6,0-7,0 a/\text{мм}^2$ — на каждый полый проводник — один сплошной: при $\Delta = 7,0-9,0 a/\text{мм}^2$ — образовать стержень только из полых проводников. В первом случае полый проводник не изолируют, во втором и третьем случае все элементарные проводники изолируют. Ориентировочную плотность тока в стержне можно найти, задавшись коэффициентом заполнения стержня медью $k_{30} = 0,66$.

$$\Delta \approx \frac{I_{\text{н}}}{a h_0 b_0 k_{30}}, \quad a/\text{мм}^2.$$

По этой плотности тока при помощи табл. (3-8) выбирают соотношение между числом полых и сплошных проводников.

Таблица 3-8

Выбор конструкции стержня, охлаждаемого водой

Вариант	Отношение числа сплошных проводников к числу полых проводников $\frac{c_{\text{зс}}}{c_{\text{зп}}}$	$\Delta, a/\text{мм}^2$	k_{30}	$k_{\text{гп}}$
1	2	4,5—6,0	0,73	1,35
2	1	6,0—7,0	0,65	1,40
3	0	7,0—9,0	0,61	1,52

Примечание. При помощи коэффициента $k_{\text{гп}}$ оценивают увеличение сопротивления стержня для переменного тока (см. § 3-8).

Ширину элементарных проводников выбирают так же, как в генераторах с поверхностным охлаждением. Высота полого проводника

$$a_{\text{эл}} \approx 4,4-4,7 \text{ мм},$$

высота сплошного проводника (рис. 1-60)

$$a_{\text{ос}} = 1,9-2,1 \text{ мм}.$$

Сечение канала в полом проводнике составляет около 25% полного сечения проводника. Толщина стенок канала на широкой стороне около 1 мм, на узкой стороне — около 2 мм. Размеры $a_{\text{эл}}$ и $a_{\text{ос}}$ уточняют при вычерчивании эскиза стержня. При этом

необходимо для осуществления транспонирования проводников соблюдать следующее соотношение:

$$0,5c_{эл} (a_{эл} + \Delta_n) + 0,5c_{св} (a_{св} + \Delta_n) = h_0 - a_{нп},$$

где $c_{эл}$ — четное число полых проводников в стержне;
 $c_{св}$ — число сплошных проводников в стержне, находящиеся в выбранном соотношении с $c_{эл}$.

Примечание. В варианте 1 (табл. 3-8) полые проводники изоляции не имеют.

В процессе выбора размеров элементарных проводников размеры стержня и паза можно изменить. Сечение стержня (без учета скругления углов)

$$s \approx c_{эл} (a_{эл} b_0 - a_0 b_0) + c_{св} a_{св} b_0, \text{ мм}^2.$$

Окончательно плотность тока в стержне

$$\Delta = \frac{I_n}{as}, \text{ а/мм}^2.$$

§ 3-3. ВЫБОР ЗАЗОРА МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА И ВЫСОТЫ ЕГО ЯРМА

Минимальный зазор между статором и ротором выбирают так, что получают заданное значение индуктивного сопротивления взаимной индукции по продольной оси x_{ad} (см. § 3-8).

Предварительно при помощи табл. 2-1 должен быть установлен коэффициент полюсного перекрытия α и намечено отношение максимального зазора под краем полюса δ_{\max} к минимальному δ .

Для уменьшения содержания высших гармоник индукции в кривой поля обычно принимают

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5.$$

Тогда минимальный зазор

$$\delta = 0,562 \left(\frac{k_0}{k_b} \right) \frac{\tau k_d A k_{FN}}{B_\delta}, \text{ см}, \quad (3-36)$$

где k_0 — обмоточный коэффициент по § 3-1;
 $k_b = 1,1-1,15$ — коэффициент воздушного зазора (его уточняют по формулам, приведенным ниже, после выбора ориентировочного значения δ);
 A — окончательная линейная нагрузка по § 3-1, а/см;

$B_\delta = \frac{B_{6н}}{k_E}$ — максимальная индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении ($B_{6н}$ по § 3-1, k_E — по § 2-2);

k_d — коэффициент, определяемый по рис. 3-3 при

$$\frac{\delta}{\tau} = 0,05 \text{ и } \alpha \text{ по табл. 2-1;}$$

$k_{FN} = \frac{F_{\delta 12}}{F_{\delta k_n}} \approx 0,95$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и подполосного зазора.

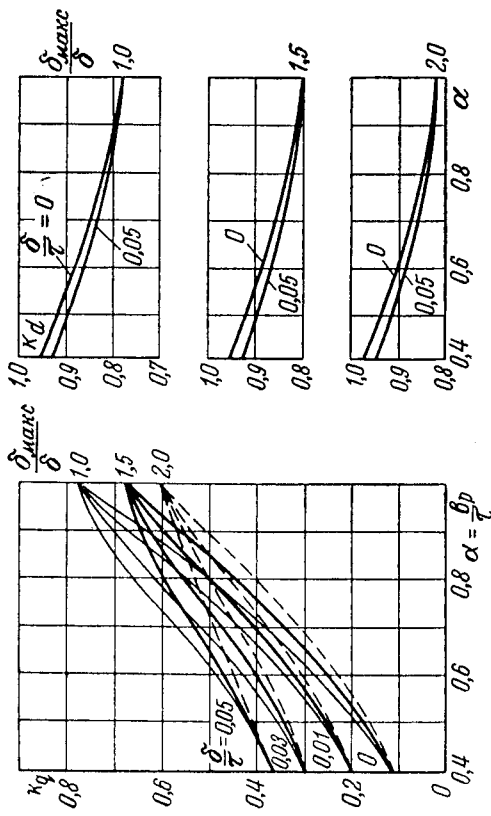


Рис. 3-3. Коэффициенты для расчета эквивалентного зазора по продольной k_d и поперечной k_d оси

Если задано не x_{ad} , а индуктивное сопротивление по продольной оси x_d в относительных единицах или отношение короткого замыкания ОКЗ, то x_{ad} (в относительных единицах) можно найти по формулам:

$$x_{ad} = x_d - x_\sigma \approx x_d - 0,125, \quad (3-37)$$

$$x_d \approx \frac{1,15}{\text{ОКЗ}}. \quad (3-38)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния x_σ (в относительных единицах) можно ориентировочно определить по формуле

$$x_\sigma = 0,7 \frac{A}{B_\delta} \left[\frac{h_n}{b_{пг}} + \frac{\tau}{l_\delta} \right], \quad (3-39)$$

где B_δ — индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении, гс;
 h_n , τ , l_δ — размеры, см.

По производственно-монтажным соображениям минимальный зазор равен:

при $D \leq 1000$ см

$$\delta \geq 0,15 (1 + D^2 \cdot 10^{-5}), \text{ см};$$

при $D \geq 1000$ см

$$\delta \geq 0,15 (1 + D \cdot 10^{-2}) \text{ см.}$$

Если выбранный по заданным параметрам зазор не удовлетворяет этим условиям, его выбирают по (3-40).

В этом случае параметры x_a , x_{ad} , ОКЗ получаются лучшими, чем это требуется по условиям эксплуатации генератора.

После установления минимального зазора δ , максимального зазора под краем полюса

$$\delta_{\text{макс}} = 1,5\delta \quad (3-41)$$

и среднего зазора

$$\delta_{\text{ср}} = \delta + \frac{1}{3} (\delta_{\text{макс}} - \delta) = 1,167\delta \quad (3-42)$$

можно окончательно определить размеры по длине сердечника статора (рис. 2-2).

Полная длина сердечника статора

$$l_1 = l_1' (n_B + 1) + b_B n_B, \text{ см}, \quad (3-43)$$

где $l_1' \approx 4,0$ и $4,5$ см — средняя длина пакета сердечника статора; $b_B \approx 1,0$ см — ширина радиального вентиляционного канала в сердечнике статора;

n_B — число каналов.

Примечание. В гидрогенераторе с полным водяным охлаждением сердечник каналов не имеет. При водяном охлаждении только обмотки статора длину пакетов можно увеличить до 7—8 см.

Расчетная длина сердечника статора

$$l_\delta = l_1 - b_B n_B + 2\delta_{\text{ср}}.$$

Расчетную ширину канала при каналах только на статоре b_B' определяют при $b_B = 1$ и $\delta \leq 2,4$ см по табл. 3-9, при иных размерах по (3-44):

$$b_B' = \gamma' \delta, \quad (3-44)$$

где

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_B}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_B}{\delta}}.$$

Значения b_B' (при $b_B = 1$ см)

δ , см	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
b_B' , см	0,25	0,20	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10	0,091	0,083	0,077

Задавшись длиной пакета l_1' и шириной канала b_B и решая уравнения (3-43) и (3-44) относительно n_B , находят

$$n_B = \frac{l_\delta - l_1' - 2\delta_{\text{ср}}}{l_1' + b_B - b_B'} \quad (3-45)$$

Округлив n_B до ближайшего целого числа, значения l_δ и l_1 уточняют по уравнениям (3-43) и (3-44).

Суммарная длина пакетов сердечника

$$l_M = l_1' (n_B + 1), \text{ см.} \quad (3-46)$$

Высоту ярма сердечника статора h_a (рис. 2-2) выбирают по допустимой индукции B_a :

$$h_a = \frac{\Phi_n}{2l_M B_a k_c}, \text{ см}, \quad (3-47)$$

где $B_a = 13\,500$ — $14\,000$ (до 14 500) — допустимая индукция в ярме статора при номинальной нагрузке, гс;

$\Phi_n \approx \frac{k_E U_n f 10^8}{4k_B / k_0 \omega}$ — магнитный поток при номинальной нагрузке (в первом приближении), мкс;

f и k_E по § 2-2; ω и k_0 по § 3-1; $k_B = 1,09$ — ориентировочное значение коэффициента формы поля при $\delta_{\text{макс}}/\delta = 1,5$;

k_c — коэффициент заполнения пакета сталью (для обычных применяемых лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм коэффициент $k_c = 0,93$).

При выборе высоты и индукции в спинке необходимо иметь в виду, чтобы при штамповке сегмента из стандартного листа стали отходы были минимальными.

Высота сегмента, равная сумме h_n и h_a , с учетом припуска на штамповку целое число раз укладывается в высоту стандартного листа.

Наружный диаметр сердечника статора

$$D_a = D + 2h_n + 2h_a \quad (3-48)$$

§ 3-4. ВЫБОР РАЗМЕРОВ СЕРДЕЧНИКА РОТОРА И ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ

Размеры полюса ротора и межполюсного окна зависят как от магнитного потока гидрогенератора при нагрузке и требуемой намагничивающей силы обмотки возбуждения, так и от механических усилий, действующих на его элементы.

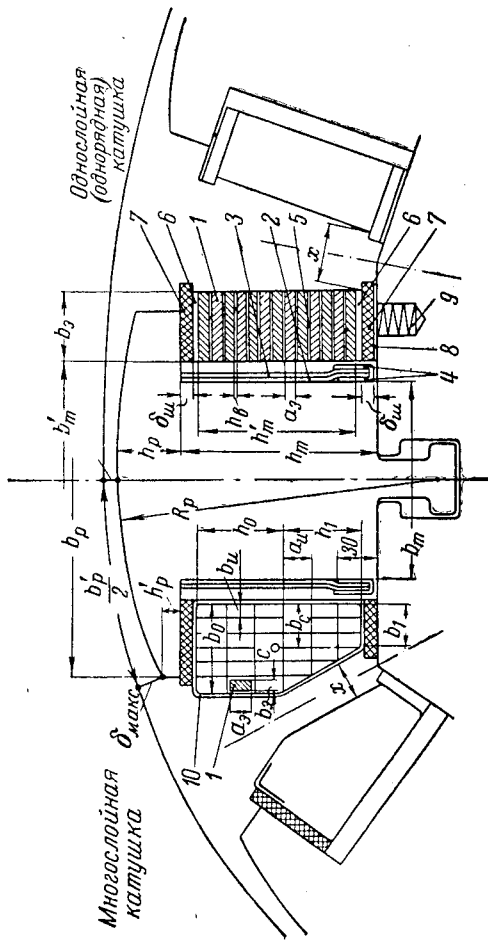


Рис. 3-4. Масштабный эскиз полюса и обмотки возбуждения

Поэтому выбор размеров полюса производят применительно к определенной конструкции полюса и определенным материалам, из которых он изготовлен.

Приведенные ниже рекомендации по выбору ориентировочных размеров относятся к роторам обычной конструкции (см. § 1-7; 1-8; 1-9; 1-10), в которой применены:

- а) полюса, собранные из листов стали Ст. 3 толщиной 1,0—1,5 мм и стянутые шпильками посредством нажимных щек;
- б) кованые стальные нажимные щетки;
- в) крепление полюсов к ободу при помощи Т-образных хвостов;
- г) однослойные катушки обмотки возбуждения, намотанные на узкую сторону провода.

При расчете ориентировочных размеров полюса вычерчивают масштабный эскиз полюса и межполюсного окна (рис. 3-4). Затем изображают эскиз изоляции и обмотки возбуждения.

Размеры полюса можно считать окончательно установленными только после проведения расчета магнитной цепи при нагрузке, определения размеров обмотки возбуждения и тока возбуждения, а также механического расчета ротора.

Длина полюсной дуги и радиус окружности дуги полюсного наконечника

Длину полюсной дуги (см. рис. 3-4) определяют по формуле (3-49)

$$b_p' = \alpha \tau,$$

в которой α — коэффициент полюсного перекрытия, выбираемый по табл. 2-1.

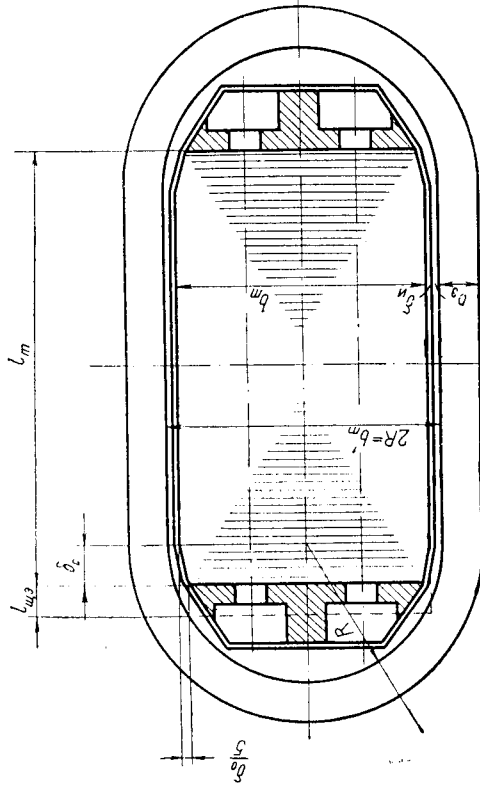


Рис. 3-5. Определение площади сечения полюса и длины витка обмотки возбуждения

При $2p > 8$ (т. е. во всех гидрогенераторах) хорда полюса b_p практически не отличается от полюсной дуги b_p'

$$b_p = b_p' = \alpha \tau. \quad (3-50)$$

Радиус, которым очерчена дуга полюсного наконечника,

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_{\text{макс}} - \delta)}{b_p^2}}. \quad (3-51)$$

Длина сердечника полюса без учета нажимной щетки выбирается обычно несколько меньшей, чем длина сердечника статора

$$l_m = l_1 - 0,1\tau, \quad (3-52)$$

Размеры нажимной щеки, имеющей сложную форму, устанавливаются при детальном проектировании. Эквивалентную длину щеки (рис. 3-5), необходимую для расчета сечения полюса и проводности рассеяния, можно ориентировочно определить по формуле

$$l_{цз} = 0,1 b_p. \quad (3-53)$$

Демпферная обмотка

Шаг t_{z2} и число демпферных стержней на полюс n_c выбирают из условия получения минимальных пульсаций э. д. с. обмотки статора.

При целом числе пазов на полюс и фазу q , при $q = b + \frac{c}{d} = b + \frac{1}{2}$ и при $bd + c \leq 9$ желательно выполнить следующие условия:

а) выбрать шаг пазов демпферной обмотки t_{z2} меньшим, чем зубцовое деление статора t_z :

$$0,8t_z < t_{z2} < t_z; \quad (3-54)$$

б) для исключения из кривой э. д. с. высших гармонических порядка $6q \pm 1$ необходимо, чтобы

$$(n_c - 1) \cdot t_{z2} = \frac{6kq}{6q \pm 1} t_z, \quad (3-55)$$

где k — целое число.

При $bd + c > 9$ шаг демпферной обмотки можно принимать равным зубцовому делению статора:

$$t_{z2} = t_z, \text{ см.} \quad (3-56)$$

Число стержней на полюс выбирают так, что расстояние между крайним стержнем и краем полюсного башмака составляет не менее 1 см

$$1 + \frac{b_p - d_c - 2}{t_{z2}} \geq n_c. \quad (3-56a)$$

Для получения хорошего демпфирующего эффекта (успокоения колебаний ротора в магнитном поле, ослабления поля от токов обратной последовательности при достаточном малых потерях и т. д.) демпферная обмотка должна обладать малым активным сопротивлением как для продольных, так и для поперечных токов.

В связи с этим стержни и короткозамыкающие сегменты обмотки изготовляют из меди, сегменты при помощи медных гибких перемычек объединяют в короткозамыкающее кольцо, а сечение стержней на полюс принимают равным 15—30% от сечения меди обмотки статора на полюс, (обычно 15%).

Сечение стержня, удовлетворяющего этим условиям,

$$s_c = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{(0,15 - 0,30) \tau A}{n_c \Delta}, \text{ мм}^2, \quad (3-57)$$

где Δ — плотность тока обмотки статора, $a/\text{мм}^2$;

A — линейная нагрузка статора, $a/\text{см}$.

Диаметр стержня d_c выбирают в соответствии с уравнением (3-57) кратным 0,5 мм, чему соответствует нормальный сортмент круглого цветного металла.

Размеры короткозамыкающего сегмента (высоту сегмента h_k и ширину b_k , мм) выбирают такими, что его сечение составляет около половины суммарного сечения стержней одного полюса (рис. 2-2)

$$s_k = b_k h_k \approx 0,5 n_c s_c. \quad (3-58)$$

При этом следует иметь в виду, что

$$b_k \geq 0,7 d_c,$$

$$h_k \geq 2 d_c.$$

Сечение перемычки между сегментами разных полюсов составляет не менее 0,6 от сечения сегментов. Площадь поверхности контакта сегмента с соединительной перемычкой составляет не менее пяти сечений короткозамыкающего сегмента.

Размеры прорези паза успокоительной обмотки (ширину прорези $b_{п2}$ и высоту прорези h_4) уточняют при расчете сверхпереходного индуктивного сопротивления. В первом приближении их можно взять равными 0,3 см:

$$b_{п2} \approx h_4 \approx 0,3 \text{ см.} \quad (3-59)$$

Длину стержня l_c (рис. 2-2) принимают возможно меньшей. Окончательно устанавливают при разработке конструкции. В первом приближении

$$l_c = l_1 + (0,2 \div 0,4) \tau.$$

Высоту полюсного наконечника (рис. 2-2 и 3-6) выбирают, исходя из нескольких соображений. С ростом высоты полюсного наконечника возрастают рассеяние полюсов

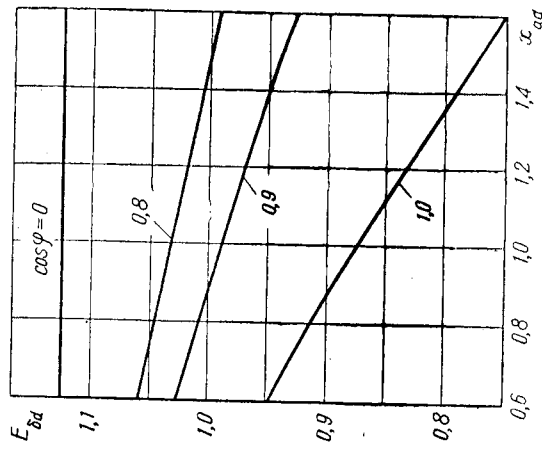


Рис. 3-6. Определение э. д. с. от результирующего потока по продольной оси

и переходное индуктивное сопротивление x_d' , что увеличивает стоимость гидрогенератора и ухудшает его динамическую устойчивость. Вместе с тем при небольшой высоте полюсного наконечника его прочность может оказаться недостаточной для восприятия центробежных усилий при угонной скорости вращения.

Высоту наконечника устанавливают достаточной для размещения на его краях стержней демпферной обмотки.

В гидрогенераторах, имеющих обычно $2p \geq 12$, предварительную высоту полюсного наконечника при отсутствии демпферной обмотки выбирают по табл. 3-10.

Таблица 3-10

Высота наконечника полюса							
τ , см...	20	30	40	50	60	70	80
h_p , см...	1,6—2,2	2,2—3,0	3,0—3,7	3,7—4,5	4,5—5,5	5,5—6,5	6,0—7,5

Высоту полюсного наконечника генератора с демпферной обмоткой увеличивают по сравнению с рекомендацией (табл. 3-10) на величину диаметра стержня.

Высота сердечника полюса зависит главным образом от полюсного деления, и ее выбирают по табл. 3-11.

Таблица 3-11

Отношение высоты сердечника полюса к полюсному делению							
τ ...	20	30	40	50	60	70	80
h_m/τ	0,7—0,8	0,7—0,6	0,63—0,55	0,56—0,47	0,47—0,41	0,4—0,35	0,32—0,28

Выбранная высота полюса h_m составляет 15—30 см.

Причем в генераторах с внутренним охлаждением высоту сердечника полюса для уменьшения рассеяния полюсов и переходного индуктивного сопротивления уменьшают по сравнению с рекомендациями (табл. 3-10): для генераторов с полным внутренним охлаждением — примерно в 1,5 раза, со смешанным внутренним охлаждением — примерно в 1,15 раза. Причем для генераторов первого типа $h_m \approx h_p$, для второго типа $h_m \approx 1,4h_p$.

Для определения ширины полюсного сердечника b_m (рис. 2-2, 3-6 и 3-7), кроме выше определенных размеров полюса, необходимо знать поток при номинальном напряжении и холостом ходе Φ и поток в основании сердечника полюса при номинальной нагрузке $\Phi_{mн}$. До проведения расчета магнит-

ной цепи (см. § 3-5) последний можно определить только ориентировочно.

Если считать, что относительная характеристика холостого хода машины не отличается от нормальной (табл. 13-14), то поток можно найти при помощи метода частичных характеристик намагничивания, изложенного в § 3-6.

Как видно из векторной диаграммы явнополюсной машины, построенной без учета насыщения по поперечной оси при номинальной нагрузке ($U_n = 1$, $I_n = 1$), результирующая э. д. с. от продольного поля $E_{\delta d}$, а также тангенс угла ψ между этой э. д. с. и током зависят только от угла φ между напряжением и током и индуктивного сопротивления по поперечной оси $x_q = x_{aq} + x_{\sigma}$:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{I_n x_q + U_n \sin \varphi}{U_n \cos \varphi} = \frac{x_{aq} + x_{\sigma} + \sin \varphi}{\cos \varphi}, \quad (3-60)$$

$$E_{\delta d} = U_n \cos(\psi - \varphi) + I_n x_{\sigma} = \cos(\psi - \varphi) + x_{\sigma}. \quad (3-61)$$

Результирующий поток взаиминдукции по продольной оси пропорционален $E_{\delta d}$:

$$\Phi_{\delta d} = \Phi \frac{E_{\delta d}}{U_n} = \Phi E_{\delta d}, \quad (3-62)$$

где $\Phi = \frac{\Phi_n}{k_F}$ — поток взаиминдукции при холостом ходе и номинальном напряжении.

Магнитное напряжение зазора и сердечника статора по продольной оси F_1 можно определить по э. д. с. $E_{\delta d}$ при помощи нормальной характеристики холостого хода. При холостом ходе и напряжении $U_x = E_{\delta d}$, отличающемся не более чем на 10% от U_n , полюсы мало насыщены и н. с. обмотки возбуждения F_v практически равна магнитному напряжению зазора и сердечника статора F_1 .

Продольная н. с. якоря, приведенная к обмотке возбуждения F_{ad} , соответствует э. д. с.:

$$E_{ad} = x_{ad} I_n \sin \psi$$

по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода.

В случае нормальной характеристики холостого хода

$$F_{ad} = 0,945 E_{ad} = 0,945 x_{ad} \sin \psi. \quad (3-63)$$

Поток рассеяния полюсов при холостом ходе и номинальном напряжении

$$\Phi_{\sigma x} = (\sigma_m - 1) \Phi, \quad (3-64)$$

где σ_m — коэффициент рассеяния полюсов при холостом ходе и номинальном напряжении.

Поток рассеяния полюсов при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\text{сн}} = \Phi_{\text{сх}} \frac{F_1 + F_{ad}}{F_{\text{вх}}} = \Phi (\sigma_m - 1) (F_1 + F_{ad}), \quad (3-65)$$

где $F_{\text{вх}} = 1$ — намагничивающая сила обмотки возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении, практически не отличающаяся от магнитного напряжения сердечника статора и зазора.

Поток в основании сердечника полюса при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\text{мн}} = \Phi_{\delta d} + \Phi_{\text{сн}} = \Phi [E_{\delta d} + (\sigma_m - 1) (F_1 + F_{ad})]. \quad (3-66)$$

В предварительном расчете $E_{\delta d}$ и $(F_1 + F_{ad})$ определяют по кривым (рис. 3-6 и 3-7), построенным при помощи уравнений (3-60—63)

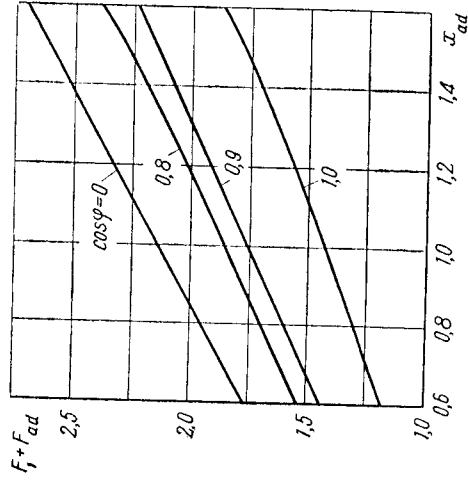


Рис. 3-7. Определение магнитного напряжения $(F_1 + F_{ad})$ при нагрузке

при среднем для гидрогенераторов индуктивном сопротивлении рассеяния $x_{\sigma} = 0,125$ и среднем соотношении между индуктивными сопротивлениями взаимной индукции по продольной и поперечной осям:

$$(x_{\alpha\alpha} = 0,632x_{ad}).$$

Коэффициент рассеяния полюсов σ_m до определения ширины полюса можно найти по приближенной формуле:

$$\sigma_m = 1 + 10 \frac{k_{\delta} \delta h_{\text{рм}}}{\alpha_{\delta} \tau \alpha_{\text{р}}} k_{\sigma}, \quad (3-67)$$

где k_{δ} и α_{δ} рассчитывают по § 3-5;

$h_{\text{рм}}$ — расчетная высота полюсного наконечника;

$$h_{\text{рм}} = \frac{2h_{\text{р}} + h'_{\text{р}}}{3};$$

$h'_{\text{р}}$ — высота края полюсного наконечника (см. рис. 3-6),

$$h_{\text{р}} = h_{\text{р}} - \frac{b_{\text{р}}^2}{8R_{\text{р}}};$$

$R_{\text{р}}$ — радиус внешней поверхности полюсного наконечника (см. выше);

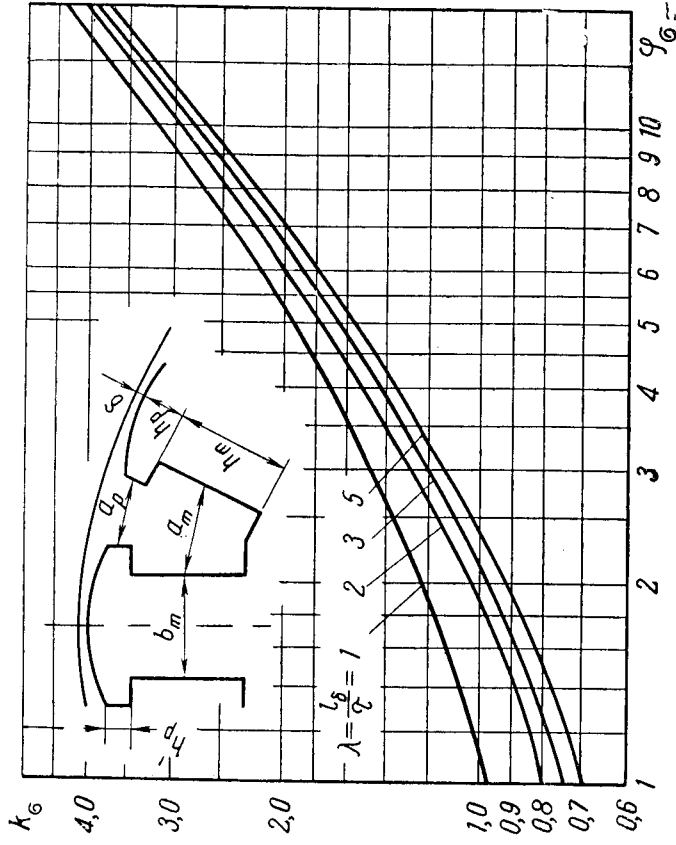


Рис. 3-8. Определение коэффициента k_{σ}

k_{σ} — коэффициент, зависящий от отношения длины сердечника к полюсному делению $\lambda = \frac{l_1}{\tau}$ и отношения размеров между полюсным окном (см. рис. 3-8);

$$\Phi_{\sigma} = \frac{h_m}{h_{\text{рм}}} \frac{a_{\text{р}}}{a_m} \quad (\text{см. рис. 3-8});$$

$a_{\text{р}}$ — среднее расстояние между боковыми поверхностями полюсного наконечника,

$$a_{\text{р}} \approx \frac{\pi (D - 2\delta_{\text{макс}} - h'_{\text{р}})}{2p} - b_{\text{р}};$$

a_m — среднее расстояние между боковыми поверхностями сердечника полюса,

$$a_m \approx \frac{\pi (D - 2\delta - 2h_{\text{р}} - h_m)}{2p} - b_{\text{р}} + 2h_{\text{р}}.$$

После определения потока Φ_{m1} ширину сердечника полюса рассчитывают по формуле

$$b_m = \frac{\Phi_{m1}}{(k_{mc} l_m B_m)}, \quad (3-68)$$

где l_m — расчетная длина сердечника полюса,

$$l_m = l_m + 2l_{цз};$$

k_{mc} — коэффициент заполнения длины сердечника сталью (для стали толщиной 1 мм коэффициент $k_c = 0,95$, для толщины 1,5 мм — 0,97);

B_m — индукция в основании сердечника полюса при номинальной нагрузке

$$B_m = 16500 - 17500 \text{ (19000), гс.}$$

Для обеспечения достаточно надежного крепления катушки полюса ширина полюсного сердечника должна удовлетворять условию

$$b_m \leq b_p - 1,5 h_p. \quad (3-69)$$

Высоту и длину обода ротора подбирают так, что механические напряжения в нем не превышают допустимых величин. Магнитная индукция в обode (ярме) ротора получается очень низкой. Это дает возможность не учитывать магнитное напряжение ярма ротора при расчете магнитной цепи.

Длина обода ротора l_{a2} несколько больше длины катушки обмотки возбуждения (см. рис. 3-5):

$$\begin{aligned} l_{a2} &= (l_m - 2 \delta_0) + 2R + 2b_0 + \Delta = \\ &= (l_m - 2\delta_0) + b'_m + 2b_0 + \Delta, \end{aligned} \quad (3-69a)$$

где $\Delta = 3 - 5$ см, $\delta_0 \approx 0,15 b_m$.

§ 3-5. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ХОЛОСТОГО ХОДА

Расчет характеристик начинают с уточнения соотношения между э. д. с. фазы статора при холостом ходе E в и потоком в зазоре

$$\Phi = \frac{10^8}{4k_F f \omega k_0} E_B = c_1 E_B, \text{ мкс,} \quad (3-70)$$

где $k_B = \frac{1,11}{k_\Phi}$ — коэффициент формы кривой поля (рис. 3-9), равный отношению эффективного значения индукции к среднему значению.

Затем определяют магнитные напряжения отдельных участков магнитной цепи (воздушного зазора между статором и ротором, зуб-

цов и ярма статора, полюса и подполюсного зазора). Все магнитные напряжения определяются на один полюс.

Магнитное напряжение зазора определяют по формуле

$$F_{\delta 12} = 0,8 B_\delta k_\delta \delta = c_6 B_\delta, \text{ а.} \quad (3-71)$$

Индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_\delta \tau l_\delta} = c_2 \Phi, \text{ гс.} \quad (3-72)$$

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия

$$a_\delta = \frac{2}{\pi} k_\Phi k_1, \quad (3-73)$$

где $k_\Phi = \frac{\Phi}{\Phi_1}$ — коэффициент потока (рис. 3-9), равный отношению полного потока к потоку первой гармоники индукции;

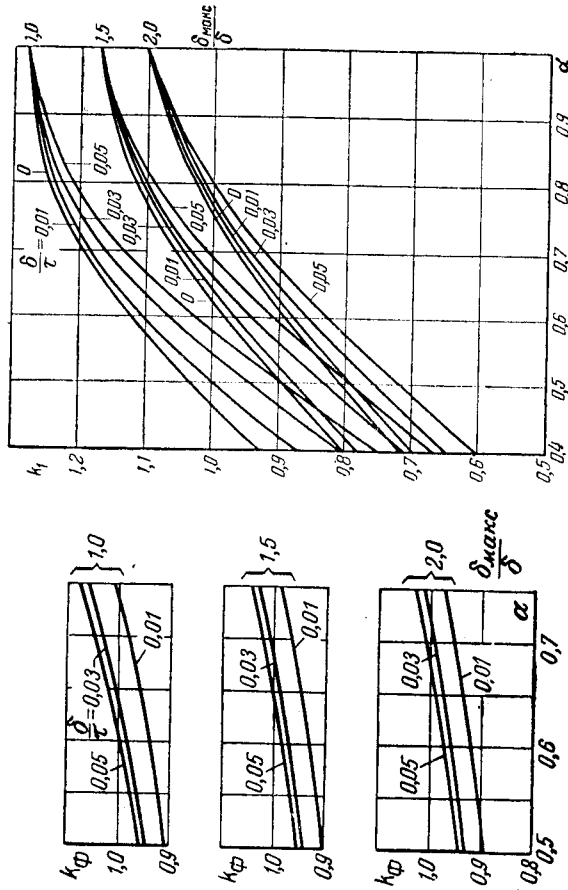


Рис. 3-9. Значение коэффициента k_Φ

Рис. 3-10. Значение коэффициента k

$k_1 = \frac{B_{\delta 1}}{B_\delta}$ — коэффициент индукции (рис. 3-10), равный отношению первой гармоники индукции к максимальной индукции в зазоре.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = k_{\delta 1} + (k_{\delta 2} - 1), \quad (3-74)$$

где коэффициент, учитывающий зубчатость статора,

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_n^2}{l_z (5\delta_{cp} + b_n) - b_n^2}, \quad (3-75)$$

коэффициент, учитывающий прорези пазов демпферной обмотки, (3-76)

Магнитное напряжение зубцов статора определяют по формуле: (3-77)

где h_n — глубина паза (или высота зубца);
 H_z — напряженность поля в сечении зубца на $1/3$ высоты от зазора, соответствующая индукции B_z в этом сечении. Индукция (3-78)

$$B_z = \frac{l_{\delta} t_z}{k_{\sigma} l_m b_z^{1/3}} B_{\delta} = c_3 B_{\delta}, \quad \text{эс}, \quad (3-78)$$

$$b_z^{1/3} = t_{1/3} - b_{\text{п}}, \quad \text{см}, \quad (3-79)$$

при $t_{1/3} = \frac{\pi \left(D + \frac{2}{3} h_{\text{п}} \right)}{z}$, см. (3-80)

Напряженность поля H_z определяют при $B_z \ll 18000$ эс по табл. П2-1. Если $B_z > 18000$ эс, то следует учесть ответвление потока в паз. В этом случае по уравнению (3-78) рассчитывают кажущуюся индукцию при отсутствии ответвления потока в паз. Напряженность поля, соответствующую действительной индукции, определяют по индукции B_z с учетом отношения между сечением воздуха и сечением стали (приложение 4, рис. П4-1)

$$k_{\text{п}1/3} = \frac{t_{1/3} l_1}{b_z^{1/3} l_m k_{\sigma}} - 1. \quad (3-81)$$

Магнитное напряжение ярма статора равно: $F_a = \xi L_a H_a$, а,

где расчетная длина магнитных линий в ярме $L_a = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4p}$, (3-82)

Рис. 3-11. Значение коэффициента ξ коэффициент ξ , учитывающий непостоянство индукции в ярме, определяют по кривой (рис. 3-11); напряженность поля H_c определяют по табл. П2-1 для индукции:

$$B_a = \frac{1}{2l_m h_a k_{\sigma}} \Phi = c_4 \Phi, \quad \text{эс}. \quad (3-83)$$

Магнитное напряжение зубцов полюсного наконечника равно:

$$F_{z2} = L_{z2} H_{z2}, \quad (3-84)$$

где $L_{z2} = (h_4 + d_c)$ — высота зубца (или глубина паза демпферной обмотки, см. рис. 2-2 и § 3-4), см;

H_{z2} — напряженность поля в наименьшем сечении зубца, соответствующая индукции B_{z2} в этом сечении.

Индукция

$$B_{z2} = \frac{l_{\delta} t_{z2}}{k_{\text{мс}} l_m b_{z2}} B_{\delta} = c_5 B_{\delta}, \quad \text{эс}, \quad (3-85)$$

где $b_{z2} = t_{z2} - 0,94 d_c$. (3-86)

Напряженность поля H_{z2} определяют по табл. П2-2. Поток рассеяния полюсов определяют по формуле (3-87)

$$\Phi_{\sigma} = 4 \lambda_{\text{в}\sigma} l_m F_1, \quad \text{мкс}, \quad (3-87)$$

где l_m — расчетная длина сердечника полюса (см. § 3-4)

$$l_m = l_m + 2l_{\text{цз}},$$

F_1 — магнитное напряжение сердечника статора, зазора и зубцов полюсного наконечника,

$$F_1 = F_{\delta 12} + F_z + F_a + F_{z2}.$$

Магнитная проводимость для потока рассеяния полюсов (на одну сторону полюса)

$$\lambda_{\text{в}\sigma} = \lambda_p + \lambda_{\text{мв}} + \lambda_{\text{мн}}, \quad (3-88)$$

где

$$\lambda_p = 1,4 \left(\frac{d_t}{a_p} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_p}{a_p} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{c_p}{a_p} - 0,5 \right)^2; \quad (3-89)$$

$$\lambda_{\text{мв}} = \frac{0,55 l_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p} (h_m + 2h_p + 2\delta)}; \quad (3-90)$$

$$\lambda_{\text{мн}} = 0,37 \frac{b_m}{l_m}; \quad (3-91)$$

$$c_p = \frac{b_p - b_m}{2}; \quad a_p = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p};$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D}.$$

При $\frac{\alpha_l}{\alpha_p} < 0,25$ первым членом в выражении для λ_p пренебрегают.

Магнитное напряжение сердечника полюса равно:

$$F_m = L_m H_m, \quad a, \quad (3-92)$$

где $L_m = l_m + 0,5l_p$ — расчетная длина магнитных линий в полюсе,

H_m — напряженность поля в сечении полюса у его основания, соответствующая индукции B_m в этом сечении.

Индукция

$$B_m = \frac{\Phi_m}{k_{mcl} b_m} = c_8 \Phi_m, \quad \text{эс}, \quad (3-93)$$

где поток в сечении полюса у его основания

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma, \quad \text{мкс}. \quad (3-94)$$

Напряженность поля H_m определяют по табл. П2-2.

Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора определяют в зависимости от индукции B_m по табл. 3-12.

Таблица 3-12

Определение магнитного напряжения стыка полюса с ярмом ротора (на один полюс)

$B_m, 10^3 \text{ эс}$	5	6	7	8	9	10	11	12
$F_{\delta m}, a$	50	80	110	140	180	230	280	350
$B_m, 10^3 \text{ эс}$	13	14	15	16	17	18	19	20
$F_{\delta m}, a$	410	480	550	620	690	760	830	900

Магнитное напряжение сердечника полюса и стыка между полюсом и ярмом ротора

$$F_2 = F_m + F_{\delta m}, \quad a. \quad (3-95)$$

Магнитное напряжение зазоров

$$F'_0 = F_{\delta 12} + F_{\delta m}, \quad a. \quad (3-96)$$

Результатирующее напряжение магнитной цепи $F_{\delta d}$, равное при холостом ходе н. с. обмотки возбуждения F_v ,

$$F_{\delta d} = F_v = F_1 + F_2, \quad a. \quad (3-97)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_H = \frac{F_{\delta d}}{F'_0} = \frac{F_1 + F_2}{F'_0}. \quad (3-98)$$

Последовательность расчета характеристик намагничивания и холостого хода

Расчет характеристики намагничивания (зависимости потока взаимной индукции Φ от н. с. возбуждения F_v) и характеристики холостого хода (зависимости э. д. с. E_v от н. с. возбуждения) сведен в таблицу 6-1, на стр. 252). Коэффициенты пропорциональности в этой таблице (c_1, c_2, c_3, \dots) заменены при расчете конкретной машины их числовыми значениями согласно вышеприведенным формулам (3-70), (3-72), (3-78) и т. д. Индукции и магнитные напряжения определяются при э. д. с.

$$E_v = (0,5 - 1,0 - k_E - 1,2 \text{ и иногда } 1,3) U_{\text{нф}}.$$

Индукции B_z, B_a при э. д. с. $E_v = k_E \cdot U_{\text{нф}}$ находятся в пределах табл. 3-13.

Таблица 3-13

Индукция в стальных участках магнитной цепи (при номинальной нагрузке)

Участки магнитной цепи	Обозначение	Индукция $B, 10^3 \text{ эс}$
Ярмо статора	B_a'	13,5—14(14,5)
Зубцы статора (у зазора)	B_a''	16—19 (20)
Зубцы статора (на 1/3 высоты от зазора)	B_z	15—18 (18,5)
Сердечник полюса	B_m	16,5—17,5(19)

В скобках указаны предельно допустимые значения индукции

За единицу н. с. обмотки возбуждения принимают н. с. $F_{vх}$ при номинальном напряжении.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения в относительных единицах получается путем деления н. с. F_v на $F_{vх}$

$$F_v^* = \frac{F_v}{F_{vх}}.$$

Характеристику холостого хода $E_v^* = f(F_v^*)$ строят по данным табл. 3-13 обычно в относительных единицах. Рекомендуется сравнить ее с нормальной характеристикой холостого хода, данные которой приведены в табл. 3-14.

Характеристики современных гидрогенераторов в насыщенной области располагаются обычно ниже нормальной характеристики холостого хода.

Таблица 3-14

Нормальная характеристика холостого хода явнопольной машины (гидрогенератора)

$F_B = \frac{F_B}{F_{BX}}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$E_B^* = \frac{E_B}{U_H}$	0	0,53	1,0	1,23	1,30

Характеристика намагничивания машины $\Phi = f(F_B^*)$ в относительных единицах совпадает с характеристикой холостого хода, поэтому строить ее отдельно не следует.

Частичные характеристики намагничивания гидрогенератора (рис. 3-12)

$$\Phi = f(F_1); \quad (3-99)$$

$$\Phi_\sigma = f(F_1); \quad (3-100)$$

$$\Phi_m = f(F_2); \quad (3-101)$$

необходимые для определения н. с. возбуждения при нагрузке, рекомендуется построить по данным табл. 3-13 в абсолютных единицах (мкс, а)

§ 3-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИЛЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

При номинальной нагрузке магнитное поле в генераторе образуется не только н. с. обмотки возбуждения F_B , но и н. с. обмотки якоря

$$F_a = 1,35 \frac{\omega k_0}{p} I_H. \quad (3-102)$$

Намагничивающую силу якоря F_a раскладывают на продольную и поперечную

$$F_d = F_a \sin \psi \quad (3-103)$$

$$F_q = F_a \cos \psi \quad (3-104)$$

составляющие, соотношение между которыми зависит от угла ψ между током I и э. д. с. от продольного поля $E_{\delta a}$.

Для того чтобы иметь возможность определить результирующую э. д. с. от поля различных по форме н. с., прямоугольной н. с. возбуждения F_B и синусоидально распределенной н. с. F_d и F_q , последние необходимо заменить эквивалентными по действию н. с. F_{ad} и F_{aq} обмотки возбуждения.

Н. с. F_{ad} и F_{aq} обмотки возбуждения считаются эквивалентными н. с. F_d и F_q обмотки якоря, если первые гармоники индукции магнитных полей в зазоре, созданных F_{ad} и F_{aq} , равны первым гармоникам индукции полей, созданных F_d и F_q .

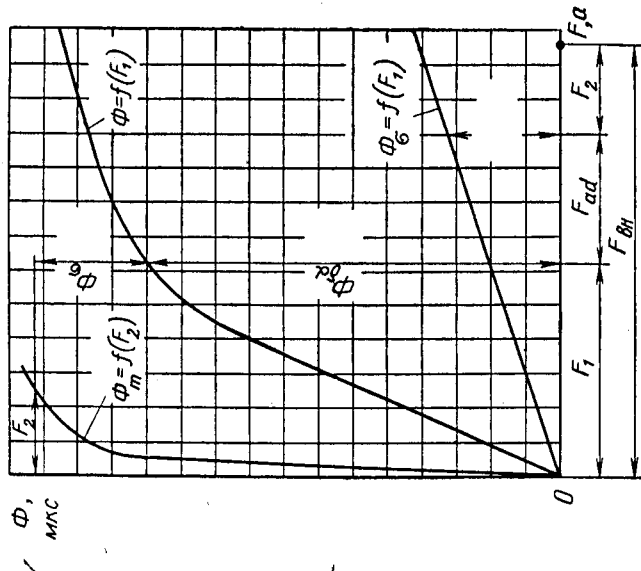


Рис. 3-12. Определение н. с. возбуждения при нагрузке при помощи частичных характеристик намагничивания

Для перехода от н. с. обмотки якоря к н. с. обмотки возбуждения вводятся коэффициенты k_d и k_q

$$F_{ad} = k_d F_d = k_d F_a \sin \psi, \quad (3-105)$$

$$F_{aq} = k_q F_q = k_q F_a \cos \psi. \quad (3-106)$$

Значения k_d и k_q , найденные путем построения картин полей и их кривых по продольной и поперечной осям машины, даны на рис. 3-3 в зависимости от α для различных значений $\frac{\delta_{\max}}{\delta}$ и $\frac{\tau}{\delta}$.

Если известны индуктивные сопротивления взаимной индукции x_{ad} и x_{aq} (см. § 3-8), то н. с. F_{ad} и F_{aq} можно найти также при помощи характеристик холостого хода.

Н. с. F_{ad} и F_{aq} соответствуют э. д. с.

$$E_{ad} = x_{ad} I_d = x_{ad} I_H \sin \psi, \quad (3-107)$$

$$E_{aq} = x_{aq} I_q = x_{aq} I_H \cos \psi \quad (3-108)$$

по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода.

При определении н. с. обмотки возбуждения при нагрузке с помощью векторной диаграммы Blondеля и частичных характеристик намагничивания (рис. 3-12) допускается, что насыщение магнитной системы по поперечной оси и взаимное влияние продольного и поперечного поля можно не учитывать.

Построение векторной диаграммы Blondеля с целью определения угла ψ , продольного тока I_d и э. д. с. от результирующего продольного поля при номинальной нагрузке показано на рис. 3-13, [1] и [3]. Диаграмму можно построить как в абсолютных, так и в относительных единицах.

Диаграмму при заданных U_H , I_H и $\cos \varphi_H$ строят в следующем порядке:

а) в произвольном масштабе изображают фазный ток I_H ;

б) под углом φ к нему в сторону опережения откладывают в некотором масштабе вектор фазного напряжения U_H ;

в) к вектору U_H добавляют падение напряжения в индуктивном сопротивлении рассеяния статора * $jx_\sigma I_H$ (расчет x_σ см. § 3-8);

г) к напряжению $jx_\sigma I_H$ добавляют вектор $jx_{aq} I_H$, конец которого (точка D) определяет направление вектора $E_{\delta d}$ и угол ψ ; д) перпендикуляр AC на отрезке OD определяет величину э. д. с. от результирующего продольного поля $E_{\delta d}$;

е) ток I_H раскладывают на продольный I_d и поперечный I_q . Коэффициента c_1 , используемого при расчете характеристики холостого хода, определяют результирующий поток продольного поля в зазоре при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\delta d} = c_1 E_{\delta d}, \text{ мкс.} \quad (3-109)$$

* Напряжение на активном сопротивлении обмотки статора r_a обычно не учитывают.

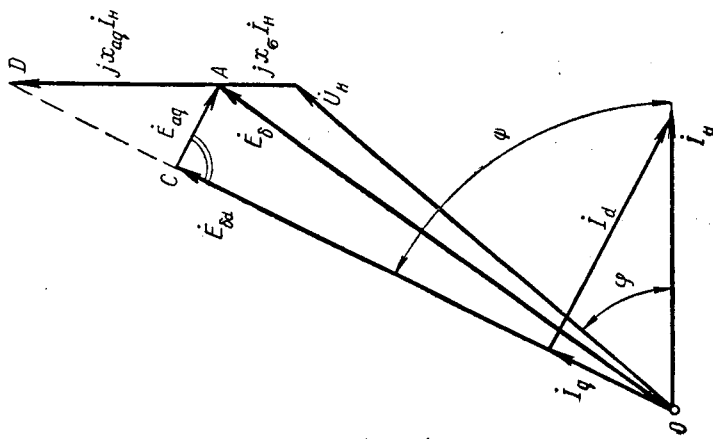


Рис. 3-13. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины

Затем определяют э. д. с.

$$E_{ad} = x_{ad} I_d, \text{ в}$$

и по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода соответствующую ей н. с. F_{ad} , а.

Если характеристика холостого хода построена в относительных единицах, E_{ad} нужно перевести в относительные единицы

$$E_{ad}^* = \frac{E_{ad}}{U_H}$$

Определив F_{ad}^* в относительных единицах, снова переходят к абсолютным единицам

$$F_{ad} = F_{ad}^* F_{вх}. \quad (3-110)$$

После определения $\Phi_{\delta d}$ и F_{ad} намагничивающую силу обмотки возбуждения с учетом увеличения рассеяния полюсов при номинальной нагрузке можно найти при помощи трех частичных характеристик намагничивания, рассчитанных в § 3-5 (см. рис. 3-12).

Магнитное напряжение сердечника статора, зазора и зубцов полюсного наконечника F_1 соответствует потоку $\Phi_{\delta d}$ по характеристике $\Phi = f(F_1)$. Добавив к F_1 продольную н. с. якоря F_{ad} , получим намагничивающую силу $(F_{ad} + F_1)$, создающую при нагрузке поток рассеяния полюсов Φ_σ . Намагничивающей силе $(F_{ad} + F_1)$ соответствует по характеристике $\Phi_\sigma = f(F_1)$ поток рассеяния Φ_σ . Поток в основании полюса и стыке полюса с ярмом ротора равен:

$$\Phi_m = \Phi_{\delta d} + \Phi_\sigma. \quad (3-111)$$

Этому потоку по кривой $\Phi_m = f(F_2)$ соответствует магнитное напряжение F_2 . Складывая F_1 , F_{ad} и F_2 , получим намагничивающую силу обмотки возбуждения при номинальной нагрузке

$$F_{вн} = F_1 + F_{ad} + F_2. \quad (3-112)$$

При правильно выбранных размерах и электромагнитных нагрузках относительная величина этой н. с.

$$F_{вн}^* = \frac{F_{вн}}{F_{вх}}$$

должна быть близка к н. с. $F_1 + F_{ad}$ по рис. 3-7.

Индукция в участках магнитной цепи при номинальной нагрузке

$$B_\delta = c_2 \Phi_{\delta d},$$

$$B_z = c_3 B_\delta,$$

$$B_a = c_4 \Phi_{\delta d},$$

$$B_m = c_8 \Phi_m.$$

§ 3-7. ВЫБОР РАЗМЕРОВ, ТОКА И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотки возбуждения гидрогенераторов изготавливают из ленточной (полосовой) меди с поперечным сечением s_b от 30 до 800 (1200) мм², намотанной на ребро. Кагушки таких обмоток состоят из одного слоя (ряда) витков, неизолированная наружная поверхность которых надежно охлаждается (рис. 3-4).

По сравнению с многослойными обмотками из изолированных проводников (рис. 3-4) в этой обмотке можно допустить значительно

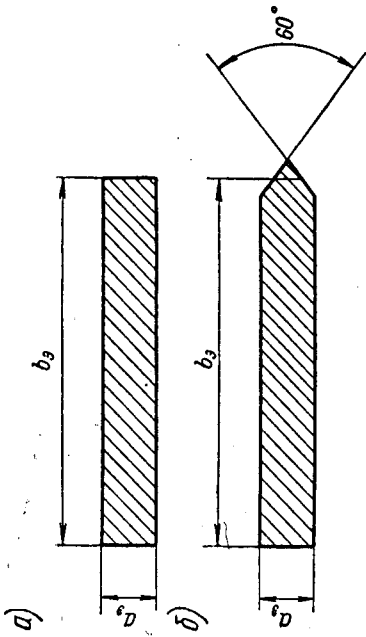


Рис. 3-14. Профили провода обмотки возбуждения

более высокие удельные тепловые нагрузки. Для увеличения поверхности, омываемой воздухом, при сечениях $s_b > 300$ мм², вместо прямоугольного профиля меди (рис. 3-14, а) применяют полосовую медь с профилем (рис. 3-14, б). Под шириной такого провода понимают ширину провода прямоугольного сечения, имеющего ту же высоту и то же сечение s_b

$$b_a = \frac{s_b}{\alpha_3}$$

Изоляцию обмотки возбуждения выполняют по классу В с допустимой температурой перегрева относительно поступающего в машину воздуха 95° С (см. табл. 3-15).

Изоляция витков катушки состоит из нескольких слоев асбестовой бумаги общей толщиной $h_b = 0,4$ мм, приклеенных лаком к широкой стороне b_3 медной полосы (рис. 3-4, табл. 3-15).

От кромки полосного башмака и поверхности ярма ротора катушку изолируют при помощи гетинаксовых шайб, боковую поверхность полюсного сердечника изолируют несколькими слоями асбестовой бумаги и микафолам.

Размеры обмотки возбуждения определяются требуемой н. с. обмотки и допустимой температурой ее нагрева.

Сечение провода обмотки возбуждения при выбранных размерах полюса и необходимой н.с. обмотки воз-

буждения в номинальном режиме $F_{вн}$ (а) зависит только от номинального напряжения возбуждения $U_{вн}$ (б)

$$s_b = 1,15 \frac{\rho l_b p F_{вн}}{25 U_{вн}} = a_3 b_3, \text{ мм}^2, \quad (3-113)$$

где ρ — удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки, равное 0,0256 при однорядной обмотке из голый полосовой меди и изоляции класса В ($t = 130^\circ \text{C}$);

p — число пар полюсов;

1,15 — коэффициент запаса.

Средняя длина полувитка обмотки возбуждения l_b зависит от размеров полюса. Для катушки, намотанной с одним радиусом закругления (рис. 3-5)

$$l_b = (l_m - 2\delta_0) + \frac{\pi}{2} (b_m + 2\delta_m + b_a), \text{ см}, \quad (3-114)$$

Таблица 3-15

Изоляция однорядной обмотки возбуждения гидрогенератора (класс В)

Обозначение по рис. 3-4	Название позиции по рис. 3-4	Число слоев	Общая толщина, мм
1	Ленточная полосовая медь	—	—
2	Изоляция сердечника полюса (на одну сторону) — асбестовая бумага толщиной 0,2—0,3 мм	Несколько	1,0—1,5
3	Изоляция сердечника полюса (на одну сторону) — микафолий толщиной 0,25 мм	2—3	0,5—0,75
4	Изоляция нижней части сердечника (на одну сторону) — суровое полотно толщиной 0,25 мм	2	0,5
5	Изоляция между витками (на один виток) — асбестовая бумага толщиной 0,2 мм	2	$h_b = 0,4$
6	Наклейка из асбестовой ткани толщиной 1,0—1,5 мм	1	1,0—1,5
7	Верхняя и нижняя изоляционные шайбы (на одну шайбу) — гетинакс толщиной $\delta_h \approx 0,06 h_m = 5; 8; 10; 12; 15$ мм	1	5—15
8	Стальная шайба толщиной 2—5 мм для упора пружин (позиция 9)	1	3—5
9	Пружины, сжимающие катушку. Полная толщина изоляции полюса (без учета витковой изоляции) $\delta_h = h_m - h_b$	$\delta_h = 2\delta_{ш} + 0,04 h_m + (5 \div 8)$	5—12
	Полная двухсторонняя толщина изоляции по ширине полюса с учетом припуска на сборку $2\delta_m = (b'_m - b_m)$		5—12

Примечания: 1. Припуск на сборку по высоте взят равным $0,04 h_m$.
2. Большие из рекомендуемых размеров выбирают при $\tau = 80$ см, меньше — при $\tau = 20$ см, при других τ — промежуточные размеры.

где l_m , b_m — длина и ширина штампованной части полюса, см;
 $\delta_0 \approx 0,15b_m$ — расстояние от центра закругления катушки до
 края штампованной части полюса (рис. 3-5);
 $2\delta_n$ — двухсторонняя толщина изоляции полюса
 с учетом припуска на сборку по табл. 3-15, см.

Если ширина провода b_a неизвестна, средняя длина полувитка
 (предварительно)

$$l_b = l_m - 0,3b_m + \frac{\pi}{2}(b_m + 2\delta_n + 0,1\tau), \text{ см.} \quad (3-114a)$$

Номинальное напряжение возбуждителя $U_{вн}$ выбирают из ряда
 напряжений 24, 35, 50, 80, 115, 230, 500 в таким образом, чтобы
 сечение провода обмотки s_b по уравнению (3-113) было равно:

$$s_b = (0,15-0,23)\tau^2, \text{ мм}^2, \quad (3-115)$$

где τ — полюсное деление, см.

При выполнении этого условия технологический процесс изготов-
 ления катушки получается наиболее простым.

В ы б о р ш и р и н ы b_a , числа витков катушки ω_b и плот-
 ности тока в обмотке Δ_b увязывают так, что перегрев обмотки
 возбуждения θ_b находится в допустимых пределах.

При этом совместно должны быть рассмотрены уравнения:

$$s_b = \frac{I_{вн}}{\Delta_b}, \text{ мм}^2, \quad (3-116)$$

$$\omega_b = \frac{F_{вн}}{I_{вн}}, \quad (3-117)$$

$$\theta_b = \frac{0,3(2,8+\lambda)\Delta_b^2 b_a}{(1,6+\sqrt{\tau})} [\text{C}], \quad (3-118)$$

где $\lambda = \frac{l_b}{\tau}$ — отношение расчетной длины гидрогенератора к полюс-
 ному делению;

b_a — ширина провода, мм.

Умножим уравнение (3-116) на (3-117):

$$s_b \omega_b = \frac{F_{вн}}{\Delta_b} \quad (3-119)$$

и выразим одностороннее сечение меди катушки $s_b \omega_b$ через ширину
 b_0 и высоту $h'_m = (a_0 + h_b) \omega_b$ катушки:

$$s_b \omega_b = a_0 b_0 \omega_b = \frac{a_0}{a_0 + h_b} (a_0 + h_b) \omega_b b_0 = k_m h'_m b_0, \quad (3-120)$$

где h_b — толщина изоляции витка;

$k_m = \frac{a_0}{a_0 + h_b}$ — коэффициент заполнения высоты катушки медью,
 зависящий от размера a_0 или от полюсного деле-
 ния τ , которому в первом приближении пропорцио-
 нальна высота провода a_0 (см. табл. 3-16).

Перепишав уравнение (3-119) с учетом (3-120) и (3-118), получим
 систему из двух уравнений, в которой неизвестными являются

Таблица 3-16

		Коэффициент k_m				
		20	30	40	60	
τ					89	
k_m		0,83	0,88	0,91	0,94	0,95

ширина провода b_0 и плотность тока Δ_b :

$$\Delta_b b_0 = \frac{F_{вн}}{k_m h'_m}, \quad (3-120, a)$$

$$\Delta_b^2 b_0 = \frac{\theta_b (1,6 + \sqrt{\tau}) k_m h'_m}{0,3(2,8 + \lambda)}. \quad (3-120, б)$$

Решая систему относительно плотности тока, получим:

$$\Delta_b = \frac{\theta_b (1,6 + \sqrt{\tau}) k_m h'_m}{0,3(2,8 + \lambda) F_{вн}}, \text{ а/мм}^2, \quad (3-121)$$

где $h'_m = (h_m - \delta_n)$ — высота катушки, мм;

δ_n — полная толщина изоляции катушки по
 высоте (табл. 3-15);

θ_b — перегрев обмотки.

Перегрев обмотки при изоляции класса В можно принять 95°C ,
 однако обычно с целью уменьшения мощности возбуждителя (или
 потерь в обмотке возбуждения) этот перегрев берут равным $70-80^\circ \text{C}$.

При выборе числа витков по уравнению (3-119) плотность тока
 следует несколько уточнить, исходя из того, чтобы число витков
 было целым числом:

$$\omega_b = \frac{F_{вн}}{s_b \Delta_b}.$$

Ширину провода, найденную из уравнения (3-120, а) и округ-
 ленную при $b_0 \leq 35 \text{ мм}$ до значения, предусмотренного в стандар-
 те (см. табл. П1-2),

$$b_0 = \frac{F_{вн}}{k_m h'_m \Delta_b}, \text{ мм}$$

можно считать окончательно установленной*, если наименьшее рас-
 стояние x между катушками соседних полюсов (рис. 3-4), необхо-
 димое для подвода охлаждающего воздуха к этим катушкам и к ра-
 диальным вентиляционным каналам статора, а также для установки

* При $s_b > 300-350 \text{ мм}^2$ применяют медь профиля, размеры которой
 не стандартизованы (рис. 3-14, б).

межкатушечных распорок, будет удовлетворять условию

$$x \geq \frac{0,01l_1\tau}{h_m} + 1,3, \text{ см.} \quad (3-122)$$

Расстояние x можно определить при помощи масштабного эскиза полюса (рис. 3-4) или рассчитать по формуле

$$x = \frac{\pi D_{a2}}{2p} - b'_m - 2b_a, \text{ см,} \quad (3-123)$$

где D_{a2} — наружный диаметр обода (рис. 2-2);

$b'_m = b_m + 2\delta_n$ — внутренняя ширина катушки (рис. 3-4 и 3-5).

Если условие (3-122) удовлетворяется, ширину катушки можно считать окончательно установленной. В противном случае необходимо внести в проект все или некоторые из рекомендуемых ниже изменений:

- увеличить до 95°C перегрев θ_v обмотки возбуждения;
 - уменьшить ширину сердечника полюса b_m за счет увеличения индукции в сердечнике до предельного значения — $19\,000 \text{ гс}$;
 - увеличить высоту полюса h_m и высоту катушки h'_m .
- При осуществлении последних двух изменений необходимо пере- считать проводимость для потока рассеяния полюсов, частичную характеристику намагничивания полюсов и уточнить н. с. возбуждения при номинальной нагрузке.

Высоту провода обмотки возбуждения

$$a_3 = \frac{s'_v}{b_3}, \text{ мм}$$

также округляют до значения, предусмотренного в стандарте (табл. III-2).

По конструктивным и технологическим соображениям (получение достаточно высокого коэффициента заполнения катушки, возможность намотки провода на узкую сторону) отношение сторон профилей провода (рис. 3-14, а или б) должно удовлетворять условию

$$\frac{b'_a}{a_3} < 10 - 12 \quad (15). \quad (3-124)$$

Если условие (3-124) не удовлетворяется, следует понизить номинальное напряжение возбудителя обратно пропорционально требуемому увеличению высоты провода a_3 ; размер b_3 при этом не изменяется.

При определении размеров обмотки возбуждения ее изображают на масштабном эскизе полюса (рис. 3-4 и 3-5). При этом можно изменить размеры изоляционных и нажимных шайб по высоте полюса (позиция 7, 8, рис. 3-4) и в случае необходимости несколько скорректировать высоту полюса.

Уточнив данные обмотки возбуждения, рассчитывают остальные ее параметры. Среднюю длину полувитка обмотки l_v определяют по уравнению (3-114). Омическое сопротивление обмотки при темпе-

ратуре 130°C , соответствующей перегреву 95°C , равно:

$$r_{в130} = 0,0256 \frac{p\psi_{вв}}{25s_{вв}}, \text{ ом.} \quad (3-125)$$

Омическое сопротивление обмотки холодной машины при $t = 15^\circ \text{C}$

$$r_{в15} = \frac{r_{в130}}{1,46}.$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{вн} = \frac{F_{вн}}{\omega_{в}}, a.$$

Ток возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении

$$I_{вх} = \frac{F_{вх}}{\omega_{в}}, a.$$

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и $t = 130^\circ \text{C}$

$$U'_{вн} = r_{в130} I_{вн}.$$

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при холостом ходе и холодном гидрогенераторе ($t = 15^\circ \text{C}$)

$$U'_{вх} = r_{в15} I_{вх}.$$

Коэффициент запаса возбуждения находится в пределах 1,1—1,2:

$$k = \frac{U_{вн}}{r_{в130} I_{вн}}.$$

Предельное (полюсное) напряжение возбудителя

$$U_{в \text{ макс}} = k_{пр} U_{вн},$$

где $k_{пр}$ — потолок возбуждения (кратность форсировки возбуждения).

Выбор размеров обмотки возбуждения при внутреннем поперечном охлаждении

Как видно из рис. 1-65, провод возбуждения имеет в этом случае переменное сечение по длине. Полное сечение провода на участке, где нет канала,

$$s' = b_3 a_3.$$

Сечение провода в зоне канала

$$s'' = b_3 (a_1 + a_2).$$

При одинаковой длине участков с каналом и без него l_0 и высоте канала, составляющей 30% от полной высоты провода,

$$s'' = 0,7 s',$$

эквивалентное по омическому сопротивлению сечение провода без каналов

$$s_b = \frac{2}{\frac{1}{s'} + \frac{1}{s''}} = 0,825 s'.$$

По этому сечению рассчитывают сопротивление и плотность тока провода. Длину канала l_0 рекомендуют взять около 0,1 от высоты сердечника полюса h_m . Эквивалентное сечение провода обмотки определяют из уравнения (3-113). Удельное сопротивление ρ_l следует взять для температуры около 100° С. При расчете средней длины витка l_v учесть, что между обмоткой возбуждения и полюсом должен быть предусмотрен канал для прохода воздуха (позиция 5 на рис. 1-65). Поэтому размер $2\delta_n = b'_m - b_m$ увеличивают. Рекомендуются взять $2\delta_n = 0,125 h_m$. При выборе ширины провода можно использовать, учитывая различие между сечениями s_b и s' , уравнение (3-120, а)

$$b_0 = \frac{I_{вн}}{0,825 k_m l_m \Delta_B}, \text{ мм.}$$

где l'_m выражено в мм.

Плотность тока в обмотке при превышении температуры обмотки 60—75° можно взять в пределах 4—4,5 а/мм². После проверки по уравнению (3-123) размер b_0 можно считать установленным. Полная высота провода

$$a_0 = \frac{s'}{b_0} = \frac{s_b}{0,825 b_0}.$$

Частичные размеры провода по высоте

$$a_0 = 0,3a_0; \quad a_1 = a_2 = 0,35a_0.$$

Ток возбуждения $I_{вн}$, число витков ω_b , сопротивление r_b определяют так же, как при поверхностном охлаждении. При определении числа витков и вычерчивании масштабного эскиза полюса плотность тока, ширину провода и ток возбуждения можно скорректировать.

§ 3-8. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ

Сопротивления обмотки статора или сопротивления; приведенные к обмотке статора, можно выражать как в абсолютных единицах (омах), так и в относительных долях единиц.

Для перевода в относительные единицы сопротивление в омах следует разделить на номинальное фазное напряжение и умножить на номинальный фазный ток

$$z = \frac{z(ом)}{U_{нф}}. \quad (3-126)$$

Выражая в формулах для относительных индуктивных сопротивлений ток $I_{нф}$ через линейную нагрузку A (или через н. с. обмотки

якоря)

$$I_{нф} = \frac{A\pi D}{2\omega m}, \quad a,$$

$$I_{нф} = \frac{\rho F_a}{0,45 m k_0 \omega}, \quad a,$$

напряжение $U_{нф}$ — через индукцию в воздушном зазоре (или поток в зазоре Φ)

$$U_{нф} = 4k_b k_0 \alpha_\delta l_\delta \tau \omega B_\delta f \cdot 10^{-8}, \quad в,$$

$$U_{нф} = 4k_b k_0 \omega f \Phi \cdot 10^{-8}, \quad в,$$

а индуктивные сопротивления — через магнитные проводимости на единицу длины λ и обмоточные данные машины и производя возможные сокращения, можно получить более удобные формулы, в которые входит отношение $\frac{A}{B_\delta}$ или $\frac{F_a}{\Phi} = 0,45 \frac{k_0}{a_0} \frac{A}{l_\delta \cdot B_\delta}$,

$$x \equiv \frac{A}{B_\delta} \lambda \equiv \frac{F_a l_\delta}{\Phi}. \quad (3-127)$$

В такой записи из формулы исключается число витков ω , зависящее от заданного напряжения. Видно, что относительное сопротивление пропорционально отношению электромагнитных нагрузок $\frac{A}{B_\delta}$ и что для снижения индуктивного сопротивления при выбранных главных размерах (см. § 2-2) нужно уменьшить линейную нагрузку и увеличить индукцию в зазоре B_δ , так, чтобы установленное в § 2-2 произведение $A \cdot B_\delta$ сохранилось.

Активное сопротивление обмотки статора определяют по формуле

$$r_a = k_r Q_{75} \frac{2l_{ср}\omega}{as}, \quad ом, \quad (3-128)$$

где $l_{ср}$ — средняя длина полувитка обмотки, м;

a — число параллельных ветвей фазы обмотки;

s — сечение эффективного проводника, состоящего из элементарных проводников сечением s_0 , мм²;

k_r — коэффициент увеличения сопротивления для переменного тока;

Q_{75} — удельное сопротивление проводника при температуре 75° С, ом мм²/м.

Коэффициент k_r для изолированных обмоток (при $f = 50$ гц) значительно отличается от единицы, если $a_0 > 0,2$ см.

Для пазов и элементарных проводников прямоугольной формы

$$k_r = 1 + \frac{l_m}{l_{ср}} (k_{rp} - 1);$$

$$k_{rp} = \Phi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \Psi(\xi),$$

где m_3 — число элементарных проводников, лежащих по высоте паза друг над другом;

$$\xi = \alpha a_0 = 2\lambda a_0 \sqrt{\frac{b_1}{b_n} \frac{f}{\varrho t} 10^{-5}}$$

При $f = 50$ гц, $t = 75^\circ \text{C}$ для медных проводников (рис. 3-15)

$$\xi = 0,95a_0 \sqrt{\frac{b_1}{b_n}} \approx 0,90a_0$$

Функции $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ даны на рис. 3-15,

$$\varphi(\xi) \approx 1 + 0,09\xi^4 \quad \text{при } 0 < \xi < 1;$$

$$\psi(\xi) \approx 0,33\xi^4$$

$$\varphi(\xi) \approx \xi \quad (\text{при } \xi > 2);$$

$$\psi(\xi) \approx 2\xi \quad (\text{при } \xi > 4);$$

a_0 — высота элементарного проводника (рис. 3-1), см.

Размеры l_n , b_1 — соответственно в § 3-3 и рис. 3-1.

Примечание. При водяном охлаждении обмотки статора среднюю температуру обмотки можно принять равной 45°C . Однако по ГОСТу сопротивление следует определять при условной рабочей температуре, равной 75°C . Коэффициент увеличения сопротивления для пазовой части стержня можно взять при $h_n - h_{кл} - \delta h \approx 12$ см для различных вариантов исполнения стержня из табл. в § 3-2. Если полная высота меди в пазу $h_n - h_{кл} - \delta h$ заметно отличается от 12 см, то коэффициент можно уточнить по формуле

$$k_{rp} = 1 + (k_{rp} - 1) \times \left[\frac{h_n - h_{кл} - \delta h}{12} \right]^2$$

Точное определение k_{rp} для стержня с полыми проводниками получается громоздким.

С учетом потерь от циркуляционных токов между элементарными проводниками, замыкающимися через пайки в лобовых частях:

$$k_r = 1 + \frac{l_6}{l_{cp}} (k_{rp} - 1) + \gamma k_i,$$

где k_i — коэффициент, позволяющий учесть потери от циркуляционных токов;

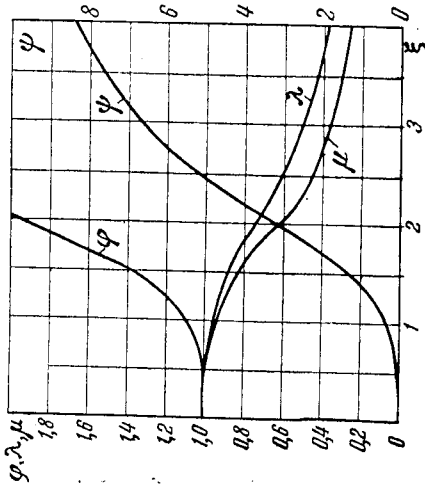


Рис. 3-15. Значения функций φ , ψ , λ , μ (ξ)

γ — коэффициент, позволяющий учесть перекручивание витков в лобовых частях и транспозицию элементарных проводников в пазу (при отсутствии скрутки витков $\gamma = 1$, для плетеного стержня $\gamma = 0$, при наличии скрутки γ определяются по табл. 3-17).

Таблица 3-17

Значения коэффициента γ^*

Число витков в катушке	Значения коэффициента γ^*					
	2	3	4	6	8	10
Сокращение шага обмотки $\beta = y/\tau$	0,8	0,26** (0,08)	0,11 (0,08)	0,13 (0,22)	0,26	0,38
	1,0	0,26 (0,08)	0,02 (0,05)	0,02 (0,20)	0,15	0,28
						0,47
						0,39

* В интервале сокращений шага от 0,65 до 0,8 возможна прямолнейная экстраполяция, от 0,8 до 1,0 — прямолнейная интерполяция по сокращению шага.

** Без скобок указаны значения коэффициента γ при скрутке последнего витка на стороне соединений, в скобках — при скрутке первого полувитка на стороне, противоположной соединениям.

Для обмотки, изготавливаемой из меди:

$$k_i = \frac{1,12bD_s^2\lambda}{u_{ц}^2} \left(\frac{f}{50} \right)^2,$$

$$\text{где } b = \frac{l_6}{l_{cp}}; D_s = 0,394a_0m_3; \lambda = 0,695b \left(\frac{b_1}{b_n} D_s \right)^2.$$

Омическое сопротивление обмотки возбуждения при $t = 75^\circ \text{C}$ равно:

$$r_w = \frac{\varrho_{75}}{\varrho_{130}} r_w 130, \text{ Ом,} \quad [(3-129)]$$

где $r_w 130$ — сопротивление обмотки возбуждения при $t = 130^\circ \text{C}$, рассчитанное в § 3-7.

В относительных единицах

$$r_w^* = r_w m \left(\frac{\omega k_0 k_d}{2p\omega_B} \right)^2 \frac{8}{\pi^2} \frac{I_{нф}}{U_{нф}}, \quad (3-129a)$$

где m — число фаз обмотки статора;

k_d — коэффициент (рис. 3-3).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора (с учетом взаиминдукции с другими

фазам) равно:

$$x_{\sigma} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l_6}{p q} \sum \lambda, \text{ ом}, \quad (3-130)$$

где $\sum \lambda = \lambda_{\text{н}} + \lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{л}}$;

$\lambda_{\text{н}}$; $\lambda_{\text{д}}$; $\lambda_{\text{л}}$ — коэффициенты проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния, отнесенные к единице (1 см) расчетной длины l_6 машины.

Коэффициент проводимости пазового рассеяния (рис. 3-1)

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{3\beta + 1}{4} \left(\frac{h_1}{3b_{\text{п}}} + \frac{h_2 + h_4}{b_{\text{п}}} \right), \quad (3-131)$$

где $\beta = \frac{y}{\tau}$ — коэффициент укорочения шага обмотки.

Коэффициент проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\text{л}} = 0,34 \frac{q}{l_6} (l_{\text{л}} - 0,64\tau \cdot \beta) k_{\text{л}}^2, \quad (3-132)$$

где $l_{\text{л}} = l_{\text{ср}} - l_1$ — длина лобовой части обмотки статора;

$k_{\text{л}}$ — коэффициент укорочения.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\text{д}} = 0,03 \frac{\tau \alpha_{\delta}}{\delta_{\text{ср}} k_{\delta q}}. \quad (3-133)$$

В относительных единицах

$$x_{\sigma}^* = x_{\sigma} \frac{I_{\text{нф}}}{U_{\text{нф}}} \approx 5,6 \frac{\sum \lambda}{k_0 q m} \frac{A}{B_{\delta}}, \quad (3-130, a)$$

где B_{δ} — индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении, эс.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки статора (якоря) по продольной оси равно:

$$x_{ad} = 0,0159 m \frac{f}{100} \left(\frac{w k_0}{100} \right)^2 \frac{l_6 \tau}{p \delta d}, \text{ ом}, \quad (3-134)$$

где $\delta d = \frac{k_{\delta} \delta}{k_1 k_d} \frac{F_{\delta}}{F_{\delta 12}}$ — эквивалентный зазор по продольной оси.

В относительных единицах

$$x_{ad}^* = x_{ad} \frac{I_{\text{нф}}}{U_{\text{нф}}} = \frac{k_d F_a}{F_{\delta}},$$

или

$$x_{ad}^* = 0,562 k_0 \frac{\tau}{k_1 \delta d} \frac{A}{B_{\delta}},$$

где F_a — н. с. обмотки статора при $I_{\text{н}}$ (см. § 3-6);

F_{δ} — магнитное напряжение зазоров при холостом ходе и $U_{\text{н}}$ (см. § 3-5).

Индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки статора (якоря) по попереч-

ной оси равно:

$$x_{aq} = 0,0159 m \frac{f}{100} \left(\frac{w k_0}{100} \right)^2 \frac{l_6 \tau}{p \delta d}, \text{ ом}, \quad (3-135)$$

где $\delta d = \frac{k_{\delta} \delta}{k_1 k_d}$ — эквивалентный зазор по поперечной оси;

k_d — по рис. 3-3.

В относительных единицах

$$x_{aq}^* = x_{aq} \frac{I_{\text{нф}}}{U_{\text{нф}}} = \frac{k_q F_a}{F_{\delta 12}},$$

или

$$x_{aq}^* = 0,562 k_0 \frac{\tau}{k_1 \delta d} \frac{A}{B_{\delta}}. \quad (3-135a)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения определяют обычно в относительных единицах

$$x_{\text{вс}}^* = x_{ad} \left[1,27 k_d \left(k_{\Phi} + \frac{4 F_{\delta 1}'}{\Phi} \lambda_{\text{вс}} \right) - 1 \right] = \\ = \frac{5,1 k_d^2 F_a l_1}{\Phi} \lambda_{\text{вс}} + x_{ad} (1,27 k_d k_{\Phi} - 1), \quad (3-136)$$

где Φ , F_{δ} , k_d , k_{Φ} — по § 3-3, 3-5 при $U_{\text{н}}$

$$\lambda_{\text{вс}} = \lambda_p + \frac{\lambda_{\text{мв}}}{1,53} + \frac{\lambda_{\text{мн}}}{2,65};$$

λ_p , $\lambda_{\text{мв}}$ и $\lambda_{\text{мн}}$ — см. § 3-5.

Индуктивное сопротивление рассеяния усложненной (демпферной) обмотки в относительных единицах по продольной оси равно:

$$x_{\text{усд}}^* = 4,0 \frac{F_a}{\Phi} \left(\frac{D}{4p} + \frac{2,8 \lambda_{\text{с}} l_{\text{м}}}{\pi c} \right), \quad (3-137)$$

где $n_{\text{с}}$ — число стержней на полюс;

$\lambda_{\text{с}}$ — коэффициент проводимости паза стержня для круглого стержня (рис. 2-2);

$$\lambda_{\text{с}} = 0,62 + \frac{h_{\text{с}}}{b_{\text{м2}}}.$$

По поперечной оси (для полных короткозамыкающих колец)

$$x_{\text{усд}}^* \approx 0,75 x_{\text{усд}}. \quad (3-138)$$

По поперечной оси (для короткозамыкающих сегментов, объединяющих стержни одного полюса)

$$x_{\text{усд}}^* \approx 4 x_{\text{усд}}. \quad (3-138a)$$

Омическое сопротивление усложненной обмотки явнорядной машины в от-

носительных единицах по продольной оси ($t = 75^\circ \text{C}$):

$$r_{yd}^* = 27850 \frac{F_a}{f\Phi} \left(\frac{c_c l_c}{n_c s_c} + \frac{0,4 D c_k}{\rho s_k} \right) \quad (3-139)$$

где n_c — число стержней на полюс;

s_c — сечение стержня, мм^2 ;

s_k — сечение короткозамыкающего кольца или сегмента, мм^2 ;
 l_c ; D — (по рис. 2-2), см ;

c_c , c_k — отношение удельных сопротивлений материала стержня и кольца к удельному сопротивлению меди.

По поперечной оси (для полных короткозамыкающих колец)

$$r_{yq}^* = \frac{20850 \cdot F_a}{f\Phi} \left(\frac{c_c l_c}{n_c s_c} + \frac{0,4 D c_k}{\rho s_k} \right) \quad (3-140)$$

По поперечной оси (для короткозамыкающих сегментов)

$$r_{yq}^* \approx (8 - 12) r_{kd}^* \quad (3-141)$$

Постоянные времени и индуктивные сопротивления обмоток синхронной машины при разомкнутых других обмотках:

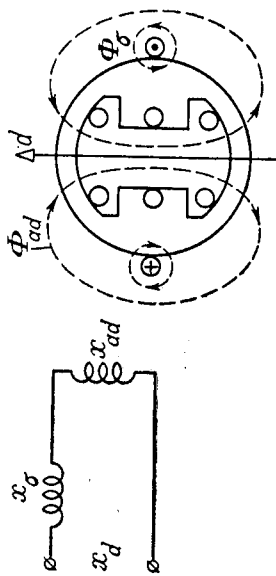


Рис. 3-16

а) Индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси при разомкнутых обмотках (контурах) ротора или в синхронном установившемся режиме (рис. 3-16)

$$x_d = x_\sigma + x_{ad} \quad (3-142)$$

б) Индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси при разомкнутых обмотках (контурах) ротора или синхронном установившемся режиме (рис. 3-17)

$$x_q = x_\sigma + x_{aq} \quad (3-143)$$

в) Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых других обмотках или контурах

(рис. 3-18)

$$x_B = x_{\text{вот}} + x_{ad} \quad (3-144)$$

$$T_B = \frac{x_B}{\omega r_B}, \text{сек.} \quad (3-145)$$

где r_B — в относительных единицах.

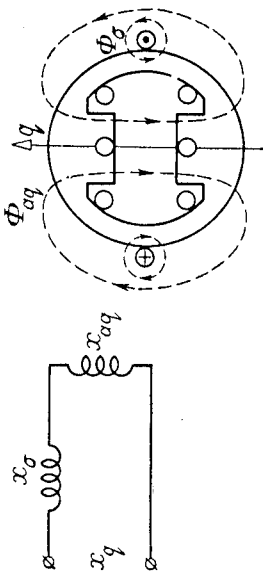


Рис. 3-17

г) Индуктивное сопротивление и постоянная времени усложненной обмотки по продольной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{yd} = x_{yod} + x_{ad} \quad (3-146)$$

$$T_{yd} = \frac{x_{yd}}{\omega r_{yd}}, \text{сек.} \quad (3-147)$$

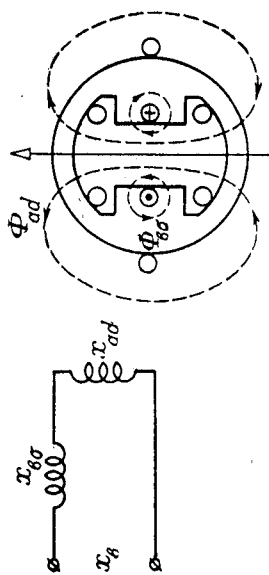


Рис. 3-18

д) Индуктивное сопротивление и постоянная времени усложненной обмотки по поперечной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{yq} = x_{yog} + x_{aq} \quad (3-148)$$

$$T_{yq} = \frac{x_{yq}}{\omega r_{yq}}, \text{сек.} \quad (3-149)$$

Постоянные времени и индуктивные сопротивления обмоток ротора синхронной машины при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутых других обмотках (контуре)

а) Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутых контурах успокоительной обмотки (рис. 3-19)

$$x'_b = x_{вс} + \left(\frac{1}{x_{ад}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1}; \quad (3-150)$$

$$T'_b = \frac{x'_b}{\omega r_b}, \text{ сек.} \quad (3-151)$$

б) Индуктивное сопротивление и постоянная времени успокоительной обмотки по продольной оси при короткозамкнутой обмотке

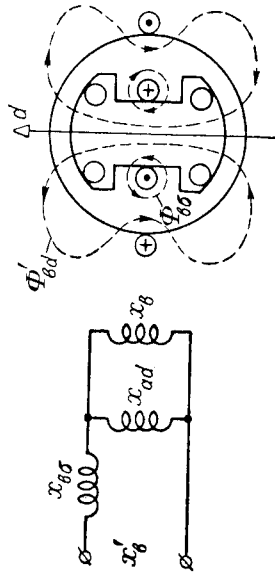


Рис. 3-19

якоря и разомкнутой обмотке возбуждения

$$x'_{yd} = x_{yad} + \left(\frac{1}{x_{ад}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1}, \quad (3-152)$$

$$T'_{yd} = \frac{x'_{yd}}{\omega r_{yd}}, \text{ сек.} \quad (3-153)$$

в) Индуктивное сопротивление взаимной индукции между контурами ротора по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря

$$x'_{y'd} = \left(\frac{1}{x'_{\sigma}} + \frac{1}{x_{ад}} \right)^{-1}. \quad (3-154)$$

г) Индуктивное сопротивление и постоянная времени успокоительной обмотки по поперечной оси при короткозамкнутой обмотке якоря

$$x'_{yq} = x_{yq} + \left(\frac{1}{x_{аq}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right)^{-1}; \quad (3-155)$$

$$T'_{yq} = \frac{x'_{yq}}{\omega r_{yq}}, \text{ сек.} \quad (3-156)$$

Параметры и постоянная времени, характерные для переходных процессов в синхронной машине с успокоительными контурами на роторе

а) Постоянная времени затухания продольных сверхпереходных составляющих токов (картина поля и схема замещения для сверхпереходных составляющих токов по продольной оси представлены на рис. 3-20)

$$T''_d = \frac{2 \cdot \sigma'_{вуд} T'_b T'_{yd}}{(1+q)(T'_b + T'_{yd})}, \text{ сек.}, \quad (3-157)$$

где $\sigma'_{вуд} = 1 - \frac{(x'_{вуд})^2}{x'_{в} x'_{уд}}$ — коэффициент рассеяния между контурами ротора;

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma'_{вуд} T'_b T'_{yd}}{(T'_b + T'_{yd})}} \approx 0.78 - 1.0.$$

Меньше из указанных предельных значений q получается при замыкании обмотки якоря на коротко, большее — при разомкнутой обмотке якоря.

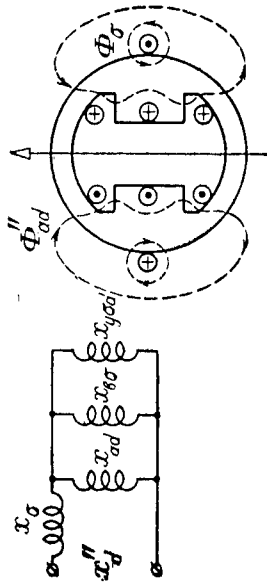


Рис. 3-20

Приближенно можно считать $q = 1$ во всех случаях, погрешность T''_d не превысит при этом 10%.

При $T'_b \gg T'_{yd}$ и $q \approx 1$

$$T''_d \approx \sigma'_{вуд} \cdot T'_{yd}, \text{ сек.}$$

б) Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси, определяющее начальное значение тока якоря при переходном процессе

$$x''_d = x_{\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ад}} + \frac{1}{x_{вс}} + \frac{1}{x_{уд}} \right)^{-1}. \quad (3-158)$$

в) Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси и постоянная времени затухания поперечных сверхпереходных токов (картина поля и схема замещения для сверх-

переходных составляющих токов по поперечной оси представлены на рис. 3-21)

$$x_d'' = x_\sigma + \left[\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{yq}} \right]^{-1}, \quad (3-159)$$

$$T_d'' = T_{yd}'', \text{ сек.} \quad (3-160)$$

г) Постоянная времени затухания переходных составляющих продольных токов

$$T_d' = \frac{1}{2} (1 + q) (T_b' + T_{yd}') \approx T_b' + T_{yd}'. \quad (3-161)$$

При $T_b' \gg T_{yd}'$ и $q \approx 1$

$$T_d' \approx T_b', \text{ сек.}$$

д) Переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси, определяющее начальное значение переходной

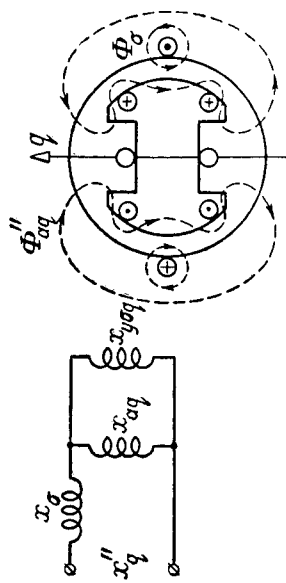


Рис. 3-21

составляющей продольного тока якоря,

$$x_d' \approx x_d \frac{T_b' + T_{yd}'}{T_b' + T_{yd}'} = x_d \frac{T_d'}{T_{d0}'}, \quad (3-162)$$

где $T_{d0}' = T_b' + T_{yd}'$ — постоянная времени затухания переходных составляющих токов ротора при разомкнутой обмотке якоря.

Выражение для x_d' получено при $q = 1$. Погрешность x_d' не превышает 10%. При $T_b' \gg T_{yd}'$ и $T_b' \gg T_{yd}'$

$$x_d' = x_\sigma + \left(\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{bg}} \right)^{-1}.$$

е) Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока якоря

$$T_a = \frac{x_2}{\omega \cdot r_a} \text{ сек.}, \quad (3-163)$$

где x_2 — см. уравнение (3-164, а, б);

r_a — без учета добавочных потерь ($k_r = 1$).

Параметры несимметричных режимов работы синхронной машины

а) Индуктивное сопротивление нулевой последовательности (в отпосительных единицах) для открытых пазов (по рис. 3-1)

$$x_0 = M + N c_y, \quad (3-164)$$

где

$$M = \frac{6,52 l_0 F_a}{k_y^2 3 q \Phi} \left[(\beta - 0,555) \frac{l_{\pi}}{b_{\pi}} + (3\beta - 2) \frac{l_2}{b_{\pi}} \right];$$

$$N = \frac{F_a}{F_\delta} \cdot \frac{3\beta - 2}{k_y^2} \left[\left(\frac{1}{3q} \right)^2 + 0,39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 + 0,037 \right];$$

$\beta = \frac{y}{\tau}$ — укорочение шага обмотки;

$c_y = 0,706$ — для явнополюсной машины без демпферной обмотки; $c_y = 0,353$ — для явнополюсной машины с демпферной обмоткой.

б) Индуктивное сопротивление для токов обратной последовательности

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2} \text{ при } x_d'' \approx x_q'', \quad (3-164a)$$

$$x_2 = \sqrt{x_q'' \cdot x_d''} \text{ при } x_d'' \ll x_q'', \quad (3-164b)$$

Механическая постоянная времени или постоянная инерции вращающихся частей синхронной машины

Время, в течение которого ротор машины под действием момента, определенного по номинальной кажущейся мощности при $\cos \varphi = 1$, разгоняется из неподвижного состояния до номинальной скорости вращения

$$T_J = \frac{\pi^2 G D^2}{S_H} \left(\frac{n_H}{60} \right)^2, \text{ сек.}, \quad (3-165)$$

где $G D^2$ выражено в $m \cdot m^2$; S_H — в kva ; n_H — в $об/мин.$

§ 3-9. ВЕСА АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВЕС РОТОРА, НАГРУЗКА НА ПЯТУ

Вес зубцов сердечника статора (§ 3-3 и 3-5)

$$G_z = 7,8 l_M k_c h_{\pi} b_{z1/2} z \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (3-166)$$

где $b_{z1/2} = \frac{\pi(D + h_{\pi})}{z}$ — средняя ширина зубца, $см$;

l_M, h_{π} — выражено в $см$.

Вес яра сердечника статора (см. § 3-3)

$$G_a = 7,8 l_M k_c \pi (D_a - h_a) h_a \cdot 10^{-3}, \text{ кг}. \quad (3-167)$$

Вес медной обмотки статора (см. § 3-2 и 3-8)

$$G_{м1} = 8,9 s_{л1} l_{ср} z \cdot 10^{-5}, \text{ кг}, \quad (3-168)$$

где s — сечение эффективного провода, мм²;
 $l_{ср}$ — длина полувитка, см.

Вес меди обмотки возбуждения (§ 3-7)

$$G_{мв} = 8,9 s_{в} (4r l_{в} \omega_{в}) \cdot 10^{-5}, \text{ кг}, \quad (3-169)$$

где $s_{в}$ — сечение провода обмотки возбуждения, мм²;

$l_{в}$ — длина полувитка обмотки возбуждения, см.

Вес стержней демпферной обмотки (§ 3-4)

$$G_{с} = 8,9 s_{с} (2r l_{с} l_{с}) \cdot 10^{-5}, \text{ кг}, \quad (3-170)$$

где $s_{с}$ — в мм², $l_{с}$ — в см.

Вес короткозамыкающих колец (§ 3-4)

$$G_{к} = 8,9 s_{к} (D - 2\delta - h_{к}) 2\pi 10^{-5}, \text{ кг}, \quad (3-171)$$

где $s_{к}$ — в мм², D — в см.

Вес стали полюсов (§ 3-4)

$$G_{п} = 7,8 l_{п} \cdot k_{пс} [h_{п} b_{п} + 0,8 h_{п} b_{п}] 2\rho 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (3-172)$$

где все размеры — в см.

Вес обода ротора

$$G_0 = 7,8 l_{a2} \frac{\pi}{4} [D_{a2}'^2 - (D_{a2}')^2] 0,9 \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (3-173)$$

где l_{a2} — длина обода, см;

D_{a2} — внешний диаметр обода, см,

$$D_{a2} = D - 2\delta - 2h_{р} - 2h_{м};$$

D_{a2}' — внутренний диаметр обода, см,

$$D_{a2}' = D_{a2} - 2h_{a2},$$

$h_{a2} \approx \tau$ — высота обода, см (предварительно). Размер уточняют при механическом расчете.

Вес ротора (с учетом веса вала)

$$G_{р} = (1,20 - 1,35) (G_0 + G_{п} + G_{мв} + G_{с} + G_{к}) 10^{-3}, \text{ т}, \quad (3-174)$$

где для обода, насаженного непосредственно на вал, следует взять коэффициент 1,2, для обода, насаженного на остов, — 1,35.

Нагрузка на подпятник в вертикальных генераторах состоит из весов ротора, рабочего колеса и вала турбины и давления воды на рабочее колесо турбины. При отсутствии данных турбины нагрузку на подпятник в гидрогенераторах с поверхностным охлаждением можно ориентировочно определить по формуле

$$G_{п} = k_{р} G_{р}, \text{ т}, \quad (3-175)$$

где $k_{р} = 3,5$ для поворотно-лопастной турбины при $k_{уг} = 2,5 - 3,5$;

$k_{р} = 2,5$ для радиально-осевой турбины при $k_{уг} \approx 1,8 - 2,2$;

$k_{р} = 2,0$ для ковшовой турбины при $k_{уг} \approx 1,6 - 1,8$.

Для гидрогенераторов с внутренним охлаждением рекомендуемые коэффициенты $k_{р}$ необходимо увеличить во столько же раз, во сколько увеличено произведение $AB_{\text{дн}}$.

§ 3-10. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Потери в средечнике статора при холостом ходе. Магнитные потери в зубцах и ярме статора

$$P_{м} = (k_{\text{да}} \rho_a G_a + k_{\text{лз}} \rho_z G_z) 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (3-176)$$

$$\rho_a = \rho_{10/50} \left(\frac{B_{a0}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3}, \text{ Вт/кг};$$

$$\rho_z = \rho_{10/50} \left(\frac{B_{z0}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3}, \text{ Вт/кг};$$

$k_{\text{да}} = 1,3$; $k_{\text{лз}} = 1,7$ — эмпирические коэффициенты;

$\rho_{10/50}$ — удельные потери в стали;

B_{a0} — индукция в ярме при $E_{в} = U_{п}$; эс;

B_{z0} — индукция в сечении на одной трети высоты зубцов при $E_{в} = U_{п}$; эс.

При толщине стали 0,5 мм для стали Э42 $\rho_{10/50} = 1,5 \text{ Вт/кг}$; для стали Э43 $\rho_{10/50} = 1,4 \text{ Вт/кг}$; для стали Э330 при магнитных линиях, совпадающих с направлением прокатки, $\rho_{10/50} = 1,05 \text{ Вт/кг}$; для стали Э330 при магнитных линиях, перпендикулярных к направлению прокатки, $\rho_{10/50} = 1,4 \text{ Вт/кг}$.

Добавочные потери на поверхности полюсных наконечников при холостом ходе

$$P_{р0} = 2\rho\alpha l_{к\lambda} \left(\frac{zn}{10\,000} \right)^{1,5} \left(\frac{B_0 t_z}{1000} \right)^2 10^{-7}, \text{ кВт}, \quad (3-177)$$

где $B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1)$, эс;

$B_{\delta 0}$ — индукция в зазоре при холостом ходе и $E_{в} = U_{п}$;

$k_{\delta 1}$ — коэффициент по § 3-5;

$k_{\lambda} = 23,3$ — при массивных полюсных наконечниках;

$k_{\lambda} = 8,6$ при полюсах из листов толщиной 2 мм;

$k_{\lambda} = 4,6$ при полюсах из листов толщиной 1 мм;

$\alpha = \frac{b_p}{\tau}$ — коэффициент полюсного перекрытия;

z — число зубцов статора; l_1 , τ и t_z выражены в см.

Потери в стали при холостом ходе

$$P_{м0} = P_{м} + P_{р0}, \text{ кВт}. \quad (3-178)$$

Потери короткого замыкания (при $f = 50 \text{ гц}$). Основные электрические (омические) потери в обмотке статора при номинальном токе и $t = 75^\circ \text{C}$

$$P_{з(75)} = 3 \frac{I_a}{k_r} I_{нф}^2 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (3-179)$$

Добавочные потери в обмотке статора

$$P_{ад} = (k_r - 1) P_{э(75)}, \text{ кВт.} \quad (3-180)$$

Добавочные потери в зубцах статора от третьей гармоники поля при коротком замыкании

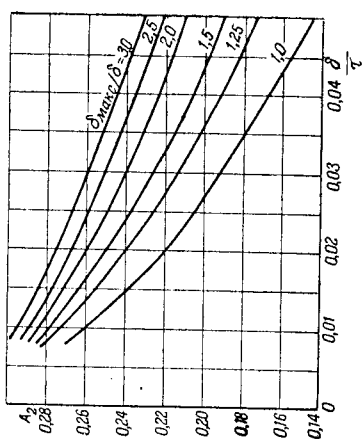
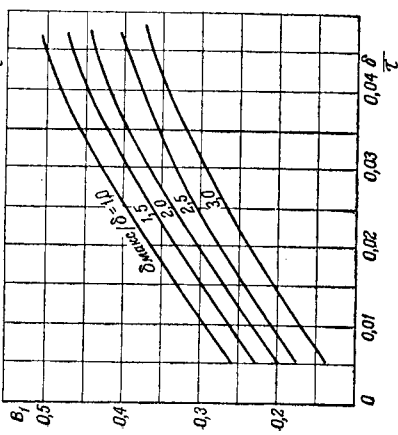
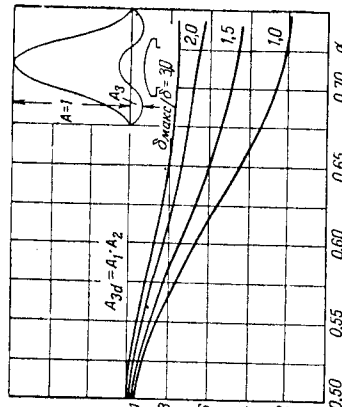
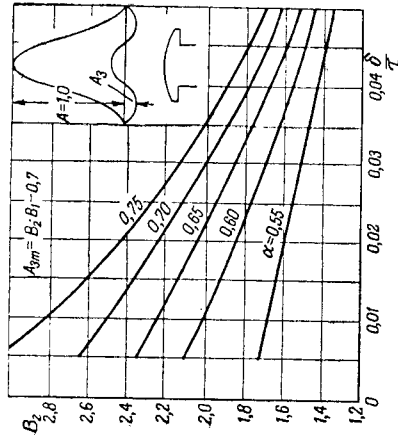


Рис. 3-22. Кривые для определения потерь от третьей гармоники поля в явнопольной машине

Рис. 3-23. Кривые для определения потерь от третьей гармоники поля в явнопольной машине

$$P_{кз} = 10,7 r_{10/50} \left(\frac{B_3}{10000} \right)^{5/4} G_z 10^{-8}, \text{ кВт,} \quad (3-181)$$

где G_z — вес зубьев статора, кг;
 $r_{10/50}$ — удельные потери в стали.

Индукция в зубцах от третьей гармоники поля

$$B_3 = B_{z0} (A_{3m} x_d + 1,27 A_{3d} x_{ад}), \text{ тс,} \quad (3-182)$$

где x_d , $x_{ад}$ — индуктивные сопротивления, выраженные в относительных единицах;

A_{3m} , A_{3d} — берут по кривым (рис. 3-22, 3-23 при $\alpha = \frac{b_p}{\tau}$).

Добавочные потери на поверхности полюсов при холостом ходе, определяемые по формуле (3-177);

$$P_{р0} = k' \left(\frac{2 p x_{ад}}{Z (k_{\delta 1} - 1)} \right)^2 P_{р0}, \text{ кВт,} \quad (3-183)$$

где $k' = 0,2$ для $\frac{\delta_{макс}}{\delta} = 1,5$;

$P_{р0}$ — потери на поверхности полюсов при холостом ходе, определяемые по формуле (3-177);
 $x_{ад}$ — в относительных единицах.

Добавочные потери на поверхности полюсного наконечника от высших гармонических н. с. статора при коротком замыкании

$$P'_{рк} = \frac{2,1}{\sqrt{q}} \left(\frac{k_{\beta} x_{ад}}{k_{\delta 1} - 1} \right)^2 P_{р0}, \text{ кВт,} \quad (3-184)$$

где q — число пазов на полюс и фазу (формулу применяют при $q = 2 - 6$);

k_{β} — коэффициент по табл. 3-18 в функции от k_y — коэффициента укорочения шага обмотки;

$x_{ад}$ — в относительных единицах.

Таблица 3-18

Значения коэффициента k_{β} в зависимости от k_y					
$k_y = 1,0$	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90
$k_{\beta} = 0,055$	0,02	0,01	0,02	0,035	0,045
$k_y = 0,88$	0,85	0,80	0,75		
$k_{\beta} = 0,05$	0,055	0,052	0,045		

Сумма добавочных потерь при коротком замыкании

$$P_{кд} = P_{эд} + P_{кз} + P_{рк} + P'_{рк}, \text{ кВт.} \quad (3-185)$$

Полные потери при коротком замыкании и номинальном токе статора

$$P_{кн} = P_{э(75)} + P_{кд}, \text{ кВт.} \quad (3-186)$$

Потери на возбуждении. Эти потери определяют для машин с присоединенным возбудителем с учетом потерь в возбудителе и потерь в переходном контакте щеток при $t = 75^\circ \text{C}$

$$P_v = \frac{(r_{в(75)} I_{кн}^2 + \Delta U_{п(вп)} I_{кн})}{\eta_v}, \text{ кВт,} \quad (3-187)$$

где $\Delta U_{п} = 2\theta$ — напряжение переходного контакта;

$\eta_v = 0,80 - 0,85$ — коэффициент полезного действия возбудителя.

Для машин с независимым возбуждением потери в возбuditеле при расчете к. п. д. генератора не учитываются

$$P_v = (c_{v75} I_{вн}^2 + \Delta U_{щ} I_{вн}) 10^{-3}, \text{ кВт.} \quad (3-188)$$

Механические потери. Потери на вентиляцию

$$P_v = 0,122 k_v \left(\frac{v}{10} \right)^2 Q = c_v \cdot Q, \text{ кВт,} \quad (3-189)$$

где v (м/сек) $\approx \tau$ — окружная скорость вращения ротора, см;
 $k_v = 1,4$ — коэффициент, учитывающий потери на трение о воздух.

Расход воздуха на охлаждение машины Q (м³/сек) уточняют при расчете вентиляции. В первом приближении его можно определить из уравнения для расчетного подогрева воздуха

$$\theta_{г1} = \frac{P_v + P_p + P_r}{1,1Q} + 0,5 \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{1,1Q}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-190)$$

и уравнения (3-189). Решив эти уравнения относительно расхода воздуха, получим

$$Q = \frac{P_v + P_p + 0,5(P_{Cu} + P_{Fe})}{1,1\theta_{г1} - c_v}, \text{ м}^3/\text{сек,} \quad (3-191)$$

где $\theta_{г1}$ — расчетный подогрев воздуха (в гидрогенераторах $\theta_{г1} = 25^\circ$);

$c_v = 0,122 k_v \left(\frac{v}{10} \right)^2$ — коэффициент из уравнения (3-189);

P_v — потери на возбуждение, кВт;

P_p — потери в сердечнике полюса, кВт, $P_r = P_{p0} + P_{pk} + P_{rk}$;

P_{Cu} — потери в обмотке статора (с учетом добавочных потерь), кВт, $P_{Cu} = P_{в(75)} + P_{ад}$;

P_{Fe} — потери в сердечнике статора, кВт, $P_{Fe} = P_m + P_{к3}$.

При смешанном внутреннем охлаждении потери P_{Cu} при расчете расхода воздуха не учитывают, поскольку они отводятся водой. При полном водяном охлаждении при расчете расхода Q следует учитывать только потери в сердечнике полюса P_p .

Потери на трение в подшипниках (подпятнике и направляющем подшипнике) вертикальных гидрогенераторов

$$P_n = A (G_n n)^{1,5} 10^{-6}, \text{ кВт,} \quad (3-192)$$

где G_n — нагрузка на подпятник, т;

A — коэффициент, зависящий от удельного давления на поверхность сегмента подпятника p_n и конструкции гидрогенератора (в зонтичных гидрогенераторах диаметр подпятника получается большим).

При среднем удельном давлении $p_n = 40$ кг/см²; для подвесных гидрогенераторов $A = 3,3$; для зонтичных гидрогенераторов $A = 4,8$.

Потери на трение в подшипниках горизонтальных гидрогенераторов

$$P_n = 2,5 G_p v_n \sqrt{\frac{n}{p_n}} 10^{-3}, \text{ кВт,} \quad (3-193)$$

где G_p — вес ротора с валом, т;

v_n — окружная скорость цапфы, м/сек;

p_n — удельное давление на проекцию цапфы, кг/см².

Диаметр цапфы можно считать равным диаметру вала со стороны привода, выбранному по номинальному вращающему моменту:

$$d_n \approx d_b = 14,5 \sqrt{\frac{S_n \cos \varphi_n}{n_n}}, \text{ см,}$$

где S_n выражено в кВа, n_n — в об/м.

Полагая, в первом приближении, что оба подшипника одинаковы и несут одинаковую нагрузку, найдем

$$v_n = \frac{\pi d_n n}{6000}, \text{ м/сек,}$$

$$p_n \approx \frac{G_p 10^3}{d_n^2}, \text{ кг/см}^2.$$

Суммарные механические потери вертикального гидрогенератора $P_r \approx P_v + 0,5 P_n$, кВт. (3-194)

Часть потерь в подпятнике вертикального гидрогенератора (обычно половину потерь) относят в соответствии с ГОСТом 183—55 к турбине.

Суммарные механические потери горизонтального гидрогенератора

$$P_r = P_v + P_n \approx 1,6 p \left(\frac{v}{40} \right)^3 \sqrt{\frac{l_1}{19}}, \text{ кВт,} \quad (3-195)$$

где $v \approx \tau$ — окружная скорость ротора, м/сек;
 p — число пар полюсов;

l_1 — длина сердечника статора, см.

Полные потери и коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{м0} + P_{кн} + P_{в(75)} + P_r, \text{ кВт.}$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{S_n \cos \varphi_n + \Sigma P}$$

После уточнения расхода воздуха на охлаждение коэффициент полезного действия рекомендуется еще раз пересчитать.

Потери на циркуляцию охлаждающей воды в генераторах с внутренним охлаждением вследствие их малости можно не учитывать.

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

§ 4-1. РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ ПОЛЮСОВ

Крепление полюсов к ободу ротора в гидрогенераторах осуществляют при помощи хвостов обычно Т-образной формы или болтов. Определим их размеры.

Крепление полюсов при помощи хвостов

Размеры полюсных хвостов и пазов в ободу ротора, в котором закрепляются полюсные хвосты, для удобства производства нормализованы.

В табл. 4-1 даны размеры пазов обода ротора и нормализованных хвостов полюсов с допускаемыми нагрузками на аксиальную

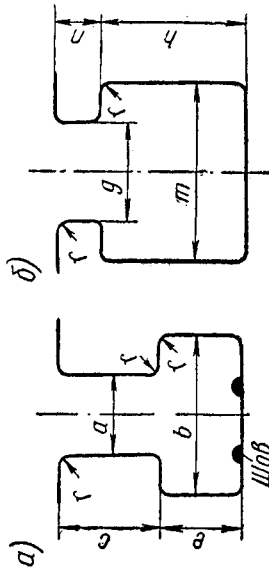


Рис. 4-1. Т-образный хвост (выступ) полюса и паз обода ротора: а) — выступ; б) — паз

длину хвоста ($кг/см$) при разной толщине листов полюса. Как видно, прочность полюсных хвостов в большой степени зависит от толщины листов, а также от наложения на нижнюю кромку хвоста сварочных швов (проваренный хвост), как показано на рис. 4-1. Проварка нижней грани хвоста непрерывным по длине полюса швом обеспечивает устойчивость плоской формы листа при больших нагрузках.

Поэтому допускаемая нагрузка для проваренных хвостов значительно больше.

Механический расчет Т-образного хвоста заключается в определении действующей на единицу его длины центростремительной силы при угонной скорости вращения ротора. Полученная из расчета нагрузка на единицу длины хвоста должна быть меньше или равна допустимой нагрузке по табл. 4-1. В случае большей нагрузки на хвост, полученной из расчета, полюс можно выполнять с двумя хвостами.

Таблица 4-1

Основные размеры нормализованных хвостов полюсов, пазов обода ротора и допускаемые нагрузки

№ хвоста	Размеры хвоста (рис. 4-1, а), мм						Размеры пазов (рис. 4-1, б), мм				Толщина листа, мм	Допускаемая нагрузка, $кг/см$	
	a	b	c	e	k*	r	g	m	h	n		п	непроваренный	проваренный
1	12	24	24	12	—	1	14	26	25	12	0,5	450	600
2	20	40	38	20	—	1,5	22	42	40	20	1	600	1100
3	26	52	50	25	80	1,5	29	55	52	25	1	700	1100
4	32	65	58	32	98	1,5	35	69	60	32	1	620	1300
5	38	70	58	32	110	1,5	42	74	60	32	1,5	2200	2900
											1,5	2100	2800
											1,5	2500	3400

* k — расстояние между двумя хвостами одного полюса.

Средний радиус центра тяжести полюса (рис. 4-2)

$$Q_m \approx H + \frac{1}{2} h_{mp}, \text{ см.} \quad (4-1)$$

Вес медной катушки на 1 см полюса

$$G'_{mv} = 2a_3 b_3 \omega_b \cdot 8,9 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} = 18,7 a_3 b_3 \omega_b \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см,} \quad (4-2)$$

где $a_3 b_3$ — сечение меди витка, см²;

ω_b — число витков в катушке.

Коэффициент 1,05 учитывает вес изоляции.

Вес сердечника полюса на 1 см длины

$$G_m = s_p \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см,} \quad (4-3)$$

где s_p — площадь полюса с полюсным наконечником, см².

Центробежная сила полюса на 1 см длины полюса

$$C'_m = \frac{n_{\max}^2}{981} \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 Q_m (G'_{mv} + G_m) = 0,112 \cdot Q_m (G'_{mv} + G_m) \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг/см,} \quad (4-4)$$

где n_{\max} — максимальная скорость, при которой ведут механический расчет,

$$n_{\max} = n_{\text{уг}} = n_{\text{в}} k_{\text{уг}}, \text{ об/мин.}$$

В случае, если C'_m превышает наибольшие допустимые нагрузки по табл. 4-1, то число Т-образных хвостов, требуемых для крепления одного полюса, определяют по формуле

$$m = \frac{C'_m}{C_{\text{доп}} k_m}, \quad (4-5)$$

где $C_{\text{доп}}$ — допускаемая нагрузка на 1 см длины хвоста, выбираемая по табл. 4-1.

Коэффициент k_m учитывает снижение допустимой нагрузки из-за неравномерности распределения нагрузки на хвосты вследствие неодинакового натяга полюсных хвостов шпонками:

$$k_m = 1 \text{ для } m = 1; 2; k_m = 0,85 \text{ для } m = 3.$$

Расстояние k между осями хвостов приведено в табл. 4-1.

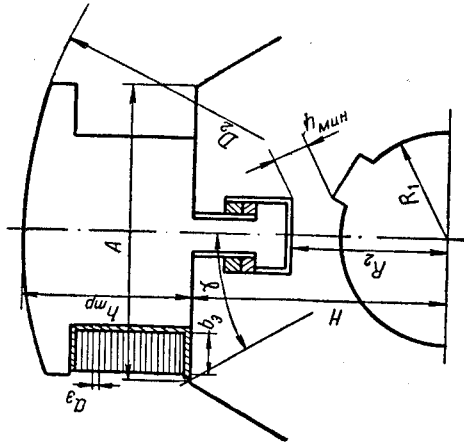


Рис. 4-2. Разрез полюса

Крепление полюсов при помощи болтов

Крепление полюсов к ободу ротора при помощи болтов осуществляют только в гидрогенераторах небольшой мощности. Для того чтобы не происходило удлинения болтов под действием центробежной силы C_m при вращении ротора, болты ставят с предварительным натягом, величина которого превышает центробежную силу на 20%. Глубина винчивания болтов в шихтованный сердечник полюса не менее 2—2,5 диаметра болта.

Растягивающие напряжения σ_s в болтах полюса определяют с учетом предварительного их натяга

$$\sigma_s = \frac{1,2 C_m}{n_b s_b}, \quad (4-6)$$

где C_m — полная центробежная сила полюса по (4-45);

n_b — число болтов;

s_b — расчетное сечение болта в см² по внутреннему диаметру резьбы d_0 по табл. 4-2.

Таблица 4-2

Нарезка болта	Таблица 4-2				
	M20	M24	M30	M36	M48
Расчетное сечение, см ²	2,2	3,1	5	7,4	13,5

Число болтов для устойчивого крепления полюса принимают не менее двух. Диаметр болтов принимают не более 40—50 мм.

Допустимое растягивающее напряжение $\sigma_{\text{доп}}$ в сечении болта под резьбой принимают около 0,5 предела текучести материала σ_s . Внутренний диаметр крепительных болтов можно определить из формулы (4-6)

$$d_0 = \sqrt{\frac{4,8 C_m}{n_b \sigma_{\text{доп}}}}, \text{ см,} \quad (4-7)$$

$\sigma_{\text{доп}} = 1200 \text{ кг/см}^2$ для болтов из стали Ст. 30.

§ 4-2. РАСЧЕТ МЕЖПОЛЮСНЫХ РАСПОРОК

Центробежную силу C_R действующую на виток при вращении ротора, приложенную к центру тяжести витка, можно разложить на две составляющие: C_e — направленную параллельно продольной оси полюса и C_n — направленную перпендикулярно к продольной оси полюса, как показано на рис. 4-3. Продольная составляющая C_e воспринимается полюсным наконечником. Поперечная состав-

ляющая вызывает изгибающие напряжения в витках катушки и может привести к их деформации, стремясь выгнуть витки в межполюсное пространство. Витки обмотки, расположенные на разных радиусах, испытывают неодинаковую центробежную силу C_R , но поперечная составляющая C_n одинакова для всех витков катушки, т. е. не зависит от положения витка по высоте полюса, что следует из рис. 4-3.

Нормальная составляющая

$$C_n = C_R \cdot \sin \alpha, \quad (4-8)$$

где

$$\sin \alpha = \frac{R}{\rho_b}.$$

Центробежную силу можно выразить через вес q_0

$$C_R = \frac{q_0}{981} \omega^2 \rho_b, \quad \text{кг/см}, \quad (4-9)$$

где $q_0 = a_0 b_0 8,9 \cdot 10^{-3}$ — вес 1 см витка обмотки (размеры a_0 и b_0 в см), кг.

Тогда получим выражение для нормальной составляющей центробежной силы на единицу длины витка:

$$C_n = \frac{q_0}{981} \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \frac{n_{\text{макс}}^2}{981} q_0 R \approx \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 a_0 b_0 R \cdot 10^{-3}, \quad \text{кг/см}. \quad (4-10)$$

Эта сила не зависит от радиуса, на котором лежит виток.

Составляющая центробежной силы на единицу длины витка C'_n на закруглениях равна:

$$C'_n = C_n \sin \varphi, \quad (4-11)$$

где φ — угол между продольной осью x витка и рассматриваемым элементом (рис. 4-4).

На рис. 4-4 показано распределение сил, перпендикулярных к оси полюса по длине катушки.

Задача определения необходимости установки распорок и их количества сводится к определению напряжения в витке, представляющем собой кривой брус, состоящий из прямой части длины L и двух полукругов радиуса R . Вследствие симметрии катушки сечения $A-A$ и $B-B$ (рис. 4-4) не поворачиваются. В этих сечениях действуют изгибающие моменты $M_{\text{п}}$.

Растягивающие усилия в сечениях $A-A$ и $B-B$ можно определить, проектируя все силы на вертикальную ось y .

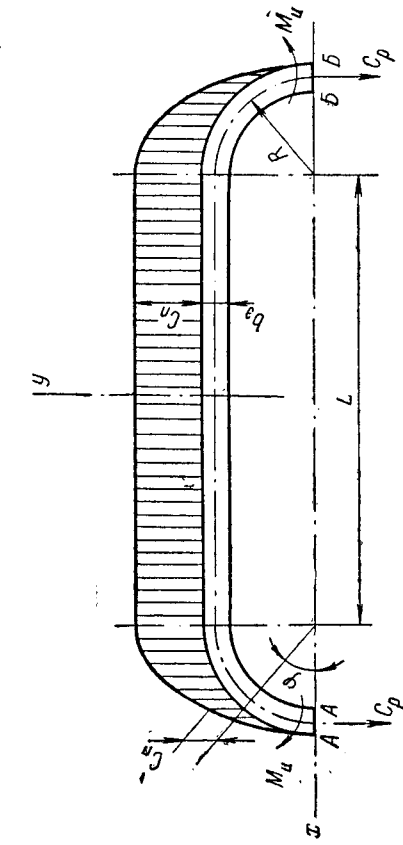


Рис. 4-4. Поперечные усилия по длине витка

т. е. при длинах катушек, когда обычно требуется установка распорок, дает ошибку менее 10%.

Максимальный изгибающий момент в местах заделки балки (сечения $A-A$ и $B-B$)

$$M_{\text{макс}} \approx \frac{C_n (2R+L)^2}{12}, \quad \text{кг/см}. \quad (4-12)$$

Одностороннее растягивающее усилие в сечении $A-A$ или $B-B$

$$C_p = \frac{C_n}{2} (2R+L), \quad \text{кг}. \quad (4-13)$$

Наибольшее растягивающее напряжение в катушке

$$\sigma_{\text{Cu макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{W_{\text{Cu}}} + \frac{C_p}{a_0 b_0}, \quad \text{кг/см}^2. \quad (4-14)$$

Подставляя значение момента сопротивления сечения витка

$$W_{\text{Cu}} = \frac{a_0^3 b_0^3}{6}, \quad \text{см}^3 \quad (4-14')$$

и значения C_p из (4-13), момента $M_{\text{макс}}$ из (4-12), получим

$$\sigma_{\text{Cu макс}} = \frac{C_n (2R+L)}{2a_0 b_0} \left[\frac{2R+L}{b_0} + 1 \right]. \quad (4-15)$$

Так как радиус закругления R витка катушки невелик по сравнению с его прямой частью L , с некоторым приближением можно считать катушку полюса за прямую балку длины $L+2R$ с заделанными концами, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой C_n . Такое приближение при соотношениях $\frac{L}{R} > 6$,

Используя выражение для C_n по (4-10) и принимая

$$\frac{2R+L}{b_0} + 1 \approx \frac{2R+L}{b_3}, \quad (4-16)$$

запишем окончательно:

$$\sigma_{Cu \text{ макс}} = \frac{R}{2b_0} (2R+L)^2 \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 k \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см}^2, \quad (4-17)$$

где R — радиус закругления витка, см;
 L — длина прямой части катушки вдоль полюса, см;
 b_0 — размер большей стороны сечения меди катушки, см;
 k — коэффициент, учитывающий уменьшение напряжений при увеличении отношения $\mu = \frac{R}{L}$,

$$k = \frac{3\pi\mu^3 + 6(\pi - 1)\mu^2 + 6\mu + 1}{(\pi\mu + 1)(2\mu + 1)^2}. \quad (4-17a)$$

На рис. 4-5 построена зависимость $k = f(\mu)$. Если катушка имеет не два, а четыре радиуса закругления, то ширина катушки будет не

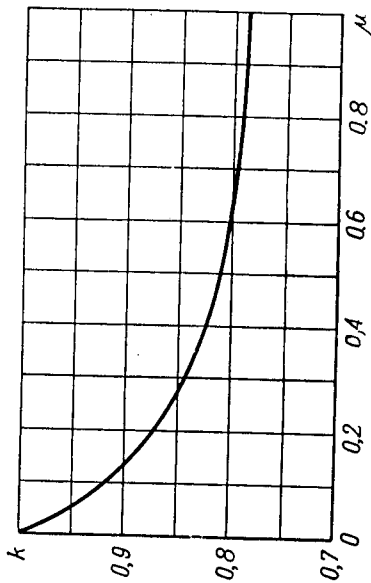


Рис. 4-5. Зависимость $k = f(\mu)$

$2R$, а $2R+L$, где l — длина прямолинейного участка лобовой части катушки. В этом случае формула (4-17) примет вид

$$\sigma_{Cu \text{ макс}} = \frac{2R+L}{4b_3} (2R+L)^2 \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 k \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см}^2. \quad (4-18)$$

Выведенные формулы (4-17) и (4-18) пригодны для подсчета напряжений в витках катушки, выполненной из меди. При выполнении катушек из алюминия напряжения в витке меньше в отношении удельных весов алюминия и меди.

Межполюсные распорки можно не устанавливать, если наибольшее растягивающее напряжение $\sigma_{Cu \text{ макс}}$ в меди катушки по (4-17) или (4-18) меньше или равно 500 кг/см^2 .

Если $\sigma_{Cu \text{ макс}} > 500 \text{ кг/см}^2$, то между катушками полюсов надо поставить распорки, различные исполнения которых показаны на рис. 1-33, 1-34 и 1-35. Путем расчета можно убедиться, что максимальный изгибающий момент, а следовательно, и максимальные растягивающие напряжения в меди витка уменьшаются в четыре раза при установке одной распорки, т. е. при уменьшении пролета витка между точками закрепления в два раза. Количество распорок, которое требуется установить между двумя полюсами, можно ориентировочно определить по формуле

$$m = \sqrt{\frac{\sigma_{Cu \text{ макс}}}{500}} - 1, \quad (4-19)$$

причем m принимают равным ближайшему большему целому числу. Напряжение в меди при наличии распорок

$$\sigma_{Cu \text{ р}} = \frac{\sigma_{Cu \text{ макс}}}{(m+1)^2}, \text{ кг/см}^2. \quad (4-20)$$

Боковое давление на распорку

$$N = 2a_0 b_0 w_b \left(\frac{2R+l}{4} \right) \left(\frac{2R+L}{m+1} \right) \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}. \quad (4-21)$$

§ 4-3. РАСЧЕТ КРОМКИ ПОЛЮСНОГО НАКОНЕЧНИКА

Опасным сечением кромки полюсного наконечника является сечение $A-A$ (рис. 4-6). Изгибающий момент в сечении $A-A$ кромки создается центробежной силой C_b обмотки и центробежной силой

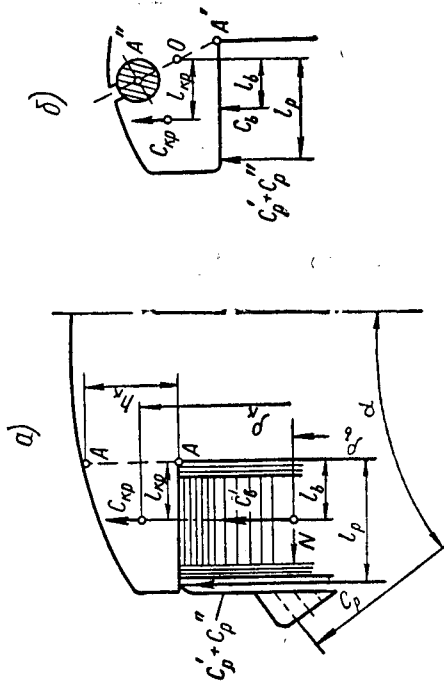


Рис. 4-6. Силы, действующие на кромку полюса

$C_{кр}$ от веса самой кромки, приложенной к центру тяжести кромки. При установке межполюсных распорок, опертых на кромку полюса (рис. 1-35), в расчет вводят момент от сил, действующих на кромку

Расчетное значение σ_{II} меньше или равно допускаемому напряжению $\sigma_{II \text{ доп}}$. В случае, если в сечении $A-A$ полагает отверстие для демпферного стержня (рис. 4-6, б) то расчет ведут так же, как и при отсутствии отверстия (рис. 4-6, а), но при расчете σ_{II} по (4-27) из высоты сечения h_k следует вычесть высоту шлица и половину диаметра отверстия.

При смещенном отверстии демпферного стержня плечи $l_{в}$, $l_{кр}$ и l_p отсчитывать до центра тяжести O сечения $A'-A''$, как показано на рис. 4-6, б. При этом высоту сечения принимают равной $A'-A''$.

§ 4.4. РАСЧЕТ ШЕКИ ПОЛЮСА

Механический расчет щеки полюса сводится к определению напряжений в наиболее напряженных местах: козырьке щеки и хвосте щеки (при креплении полюса при помощи хвостов).

Расчет напряжений в сечении $I-I$ козырька щеки

Момент центробежных сил лобовой части обмотки (справа от хорды $I-I$) относительно хорды $I-I$ (рис. 4-7, а) равен моменту площади, умноженному на центробежную силу обмотки, приходящуюся на 1 см^2 площади сегмента,

$$M_{II} = BR_2^3 \cdot 0,112 (a_3 \cdot l \cdot \omega_b \cdot 8,9 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3}) \rho_b \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2,$$

где коэффициент 1,05 учитывает вес изоляции.

Перемножая все числовые коэффициенты, получим формулу для момента центробежных сил лобовой части обмотки, имеющей один радиус закругления, как показано на рис. 4-7, а,

$$M_{II} = 1,05 a_3 \omega_b \rho_b BR_2^3 \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3}, \text{ кгсм.} \quad (4-28)$$

Для обмотки, имеющей двухрадиусное закругление лобовой части (рис. 4-7, б), момент центробежных сил можно определить по формуле

$$M_{II} = 1,05 a_3 \omega_b \rho_b \left(BR_2^3 + \frac{l b^2}{2} \right) \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3}, \text{ кгсм,} \quad (4-29)$$

где ρ_b — расстояние от оси вращения до центра тяжести сечения меди обмотки;

l — длина прямолинейного участка лобовой части обмотки, см;

B — функция $\cos \alpha = 1 - \frac{k}{R_2}$, представленная в виде кривой (рис. 4-7, в) и определяемая по формуле

$$B = \frac{2}{3} \sin^3 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha - \alpha \cos \alpha,$$

где α — в радианах.

от бокового давления обмотки через распорку и от центробежной силы распорки (все линейные размеры — в сантиметрах).

Центробежная сила 1 лог. см обмотки

$$C_{II} = 1,04 a_3 b_3 \omega_b \rho_b \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см,} \quad (4-22)$$

где ρ_b — расстояние от оси вращения до центра тяжести обмотки.

Центробежная сила 1 лог. см кромки полюса

$$C_{кр} = 0,112 G_{кр} \rho_{кр} \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2, \text{ кг/см,} \quad (4-23)$$

где $G_{кр}$ — вес 1 лог. см кромки полюса, кг;

$\rho_{кр}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести кромки, см.

Сила, действующая на 1 лог. см кромки от бокового давления обмотки через распорку,

$$C'_p = N \frac{tg \alpha}{B}, \text{ кг/см,} \quad (4-24)$$

где N — сила бокового давления на распорку по (4-21);

$$\alpha = \frac{180}{2p};$$

$2p$ — число полюсов ротора;

B — опорная длина (аксиальная) распорки на кромку.

Сила, действующая на 1 лог. см кромки от центробежной силы распорки

$$C''_p = \frac{C_p}{2B \cos \alpha}, \text{ кг/см,} \quad (4-25)$$

где полная центробежная сила распорки

$$C_p = 0,112 G_p \rho_p \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2, \text{ кг.} \quad (4-25a)$$

Здесь G_p — полный вес распорки, кг;

ρ_p — расстояние от оси вращения до центра тяжести распорки, см.

Изгибающий момент в сечении $A-A$ кромки

$$M_{II} = C_{в} l_{в} + C_{кр} l_{кр} + (C'_p + C''_p) l_p, \text{ кг,} \quad (4-26)$$

где $l_{в}$, $l_{кр}$, l_p — плечи сил до центра сечения $A-A$, см.

Напряжение в кромке от изгиба при угонной скорости ротора

$$\sigma_{II} = \frac{6M_{II}}{h_k^2}, \text{ кг/см}^2, \quad (4-27)$$

где h_k — высота сечения $A-A$ кромки полюса.

Допускаемое напряжение в кромке от изгиба для стали Ст. 3: $\sigma_{II \text{ доп}} = 700 \text{ кг/см}^2$ при толщине листов полюса 1 мм ; $\sigma_{II \text{ доп}} = 1000 \text{ кг/см}^2$ при толщине листов полюса $1,5 \text{ мм}$.

Момент сопротивления козырька щеки в сечении $I-I$

$$W = \frac{bt^2}{6} \varphi, \text{ см}^3, \quad (4-30)$$

где b и h — выражены в см (рис. 4-7, а);

φ — по кривой (рис. 4-7, в) в зависимости от $\mu = \frac{h_1}{h}$.

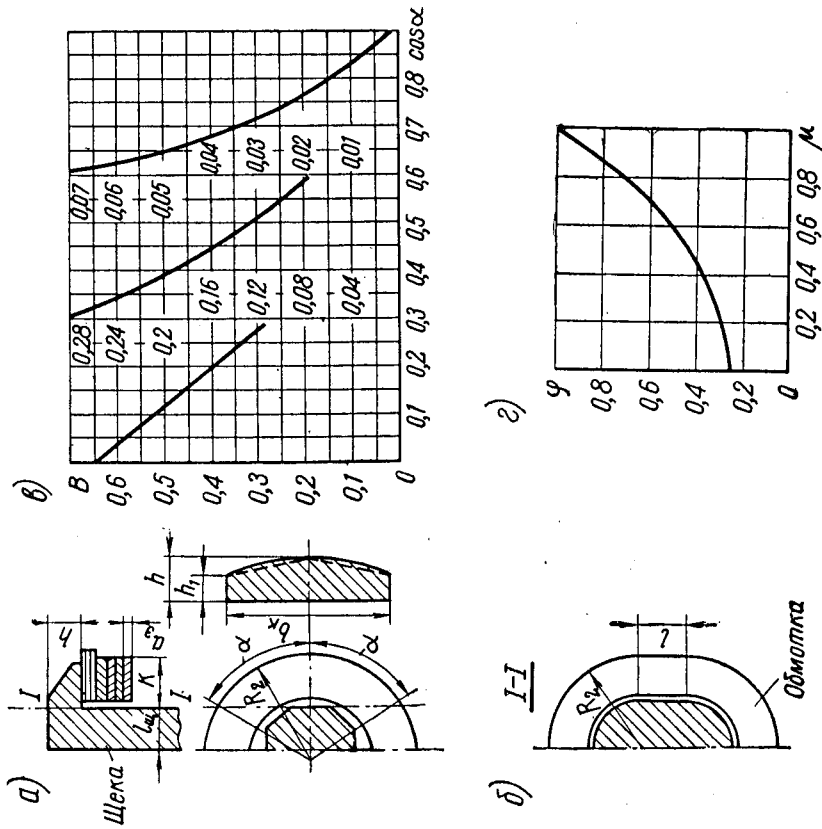


Рис. 4-7. График для расчета щеки полюса

Напряжение изгиба в сечении $I-I$ козырька щеки при угонной скорости

$$\sigma_{II} = \frac{1,15M_{II}}{W}, \text{ кг/см}^2. \quad (4-31)$$

Здесь коэффициент 1,15 учитывает увеличение напряжения от собственной центробежной силы козырька щеки.

Расчет напряжений в хвосте щеки (Т-образный хвост)

Напряжение растяжения в хвосте щеки при угонной скорости

$$\sigma_s = 0,112 \frac{G_{щ} + G_{мщ}}{m l_{щ} a} Q_{щ} \left(\frac{v_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг/см}^2, \quad (4-32)$$

где $G_{щ}$ — вес щеки, кг;

$G_{мщ}$ — вес обмотки, удерживаемой козырьком щеки, кг;

m — число хвостов щеки;

$Q_{щ}$ — радиус центра тяжести щеки с обмоткой, см;

$l_{щ}$ и a — размеры сечения хвоста в его узком месте, см.

Допускаемые напряжения для стали Ст. 3: $\sigma_{сдop} = 1200 \text{ кг/см}^2$, для стали Ст. 5: $\sigma_{сдop} = 1500 \text{ кг/см}^2$.

Напряжения σ_{II} и σ_s , рассчитанные по (4-31) и (4-32), не должны превышать допустимых.

§ 4-5. РАСЧЕТ ОБОДА РОТОРА

При вращении ротора обод испытывает растягивающее напряжение от центробежных сил, обусловленных собственным весом ротора и весом закрепленных на ободе полюсов.

Эти напряжения при некоторых значениях окружной скорости и ширины обода ротора достигают предельного значения. Дальнейшее увеличение скорости может вызвать остаточные деформации в ободе и поэтому становится опасным для гидрогенератора.

Задача расчета обода на механическую прочность сводится к определению максимальных напряжений в ободе ротора и выбору таких размеров обода, чтобы максимальные напряжения были меньше или равны допустимым при угонной скорости вращения.

Конструктивно ободы роторов выполняют литыми, дисковыми и сегментными (см. § 1-8). Ниже приводятся расчеты дисковых и сегментных ободов.

Расчет дискового обода

Расчет сердечника ротора, состоящего из цельных дисков, можно также применить для определения механических напряжений в литом сердечнике ротора или в сердечнике ротора, выполненном из толстых массивных колец, насаженных на спицы или вал.

В расчете не учитываются напряжения, вызываемые посадкой сердечника на вал, однако это практически не влияет на точность расчета, так как при угонной скорости вращения эти напряжения малы по сравнению с напряжениями от центробежной силы ротора.

Сердечник ротора (рис. 4-2) можно поделить на две части: собственно сердечник, ограниченный внутренним отверстием вала радиуса R_1 , и хвостовую зону, ограниченную внешним контуром полюсов), и хвостовую зону, ограниченную внешним контуром сердечника и окружностью радиуса R_2 .

Вес хвостовой зоны на 1 лог. см длины ротора (рис. 4-2)

$$G_{xz} = \left(2\rho A \frac{H}{2} - \pi R_2^2 \right) \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = (\rho AH - \pi R_2^2) \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \text{ кг/см}, \quad (4-33)$$

где ρ — число пар полюсов;

A, H, R_2 — размеры (рис. 4-2), см.

Центробежная сила хвостовой зоны на 1 см

$$C_{xz} = 0,112 G_{xz} \frac{H + R_2}{2} \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг/см}. \quad (4-34)$$

Радиальное напряжение на поверхности радиуса R_2

$$\sigma_p = \frac{2\rho C_m + C_{xz}}{2\pi R_2}, \text{ кг/см}^2, \quad (4-35)$$

где C_m — центробежная сила 1 лог. см полюса с обмоткой по (4-4); 2ρ — число полюсов.

Тангенциальные напряжения в сечении сердечника ротора разделены неравномерно. Максимальное тангенциальное напряжение возникает на внутренней поверхности сердечника радиуса R_1 . Оно может быть определено по формуле:

$$\sigma_t = \frac{0,02}{1 - \alpha^2} \sigma_p + T R_2^2 \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг/см}^2, \quad (4-36)$$

где $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$;

T — коэффициент для учета напряжений от центробежных сил сердечника ротора, заключенного между поверхностями радиусов R_1 и R_2

$$T = 72,4 (1 + 0,212 \alpha^2) 10^{-3}.$$

Тангенциальное напряжение в стали сердечника ротора с учетом ослабления шпоночной канавкой

$$\sigma'_t = \sigma_t \frac{R_2 - R_1}{h_{\min}}, \text{ кг/см}^2. \quad (4-37)$$

Если сечение сердечника ротора, кроме шпоночной канавки, имеет еще отверстие для стяжной шпильки диаметром $d_{ш}$, то из размера h_{\min} (рис. 4-2) надо вычесть диаметр отверстия $d_{ш}$ ($d_{ш} = 25-40$ мм) и в формулу (4-37) вместо h_{\min} подставить $h'_{\min} = h_{\min} - d_{ш}$.

Максимальные напряжения не должны превышать допустимых σ_s доп, которые принимают равными 0,6 предела текучести материала σ_s . Для стали Ст. 3 σ_s доп = 0,6 · 2200 = 1320 кг/см².

Расчет сегментного обода ротора

Сегментный обод ротора, изготовленный из отдельных сегментов листовой стали, стянутых шпильками (см. § 1-8), крепят на клиновые брусья спицевого или дискового остова ротора.

Радиальной связи между ободом и остовом ротора нет. Существует связь только тангенциальная. Число сегментов, укладываемых на окружности обода ротора (рис. 4-8),

$$n_{\text{сегм}} = \frac{2\rho}{s}, \quad (4-38)$$

где $s = 4 \div 7$ — число полюсных делений, размещенных на одном сегменте;

2ρ — число полюсов.

Число слоев сегментов в обode

$$N = k_c \frac{l_{a2}}{\Delta_c}, \quad (4-39)$$

где $k_c = 0,87 \div 0,93$ — коэффициент, представляющий отношение

ниже длины стали обода без каналов к

l_{a2} — полная длина обода с вентиляционными каналами, см;

$$\Delta_c = 4 \div 6 \text{ — толщина сегмента, мм.}$$

Между стыками сегментов оставляют пространство для улучшения охлаждения обода и полюсов.

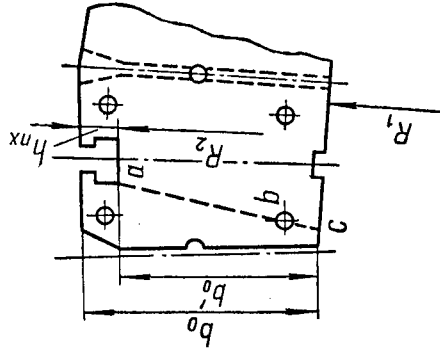


Рис. 4-8. элемент сегментного обода ротора

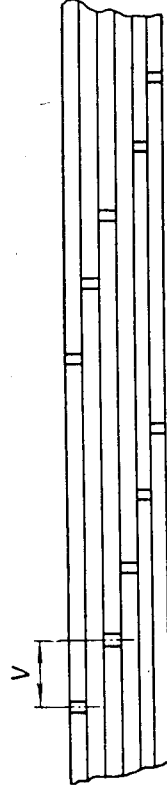


Рис. 4-9. Элементарный обод ротора. Число слоев сегментов $u = 6$

При укладке сегменты сдвигают на одно полное деление или на половину. При этом весь обод можно поделить на элементарные ободы (рис. 4-9), число слоев сегментов в которых

$$u = \frac{s}{\phi} \quad (4-40)$$

где ϕ — сдвиг соседних слоев сегментов в полюсных делениях. Обычно $\phi = 1$ или 0,5.

Вес обода ротора без хвостовой зоны

$$G'_0 = \pi D_{cp} h'_{a2} l_{a2} k_c k_{ш} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = \pi (2R_2 - h'_{a2}) h'_{a2} l_{a2} k_c k_{ш} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \text{ кг}, \quad (4-41)$$

где $h'_{a2} = h_{a2} - h_{пх}$ — высота обода ротора до хвостовой зоны, см;
 h_{a2} — полная высота обода ротора, см;
 $h_{пх}$ — высота паза обода ротора, см;
 $k_{ш} = 0,98 \div 0,99$ — коэффициент заполнения одного слоя обода ротора сталью, численно равный отношению длины сегмента к шагу сегмента.

Центробежная сила обода без хвостовой зоны

$$C_0 = 0,112 Q_0 G'_0 \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг}, \quad (4-42)$$

где $Q_0 = \frac{2R_2 - h'_{a2}}{2}$ — радиус центра тяжести обода, см.

Вес хвостовой зоны обода с учетом веса клиньев и хвостов полюсов

$$G_{хз} = \pi (2R_2 + h_{пх}) h_{пх} l_{a2} k_c k_{ш} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}, \text{ кг}. \quad (4-43)$$

Центробежная сила хвостовой зоны

$$C_{хз} = 0,112 G_{хз} (2R_2 + h_{пх}) \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг}. \quad (4-44)$$

Центробежная сила полюсов (без хвостов)

$$C_m = 0,112 Q_m (G_{мв} + G_c + G_k + G_m) \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2, \text{ кг}, \quad (4-45)$$

где $G_{мв}$, G_c , G_k , G_m — веса обмотки полюсов, стержней демферной обмотки, колец демферной обмотки, сердечников полюсов со щеками, рассчитанными в § 3-9.

Растягивающее усилие на одностороннее сечение элементарного обода от центробежных сил обода, хвостовой зоны и полюсов

$$C_{ш} = \frac{C_0 + C_{хз} + C_m}{2\pi} \cdot \frac{\mu}{N} \text{ кг}, \quad (4-46)$$

где μ — число слоев сегментов элементарного обода по (4-40);
 N — число слоев сегментов в обode по (4-39).

Растягивающие напряжения в листах (сегментах) обода при угонной скорости вращения ротора (пренебрегая силой трения между листами)

$$\sigma_s = \frac{C_{ш}}{(\mu - 1) h_{\min} \Delta_c} \text{ кг/см}^2, \quad (4-47)$$

где Δ_c — толщина листа (сегмента), см, $\Delta_c = 0,4 \div 0,6$;

h_{\min} — наименьшая высота сегмента с учетом ослабления сечения пазами для полюсного хвоста, клиновой шпонки и отверстиями для стягивающих шпилек.

Допускаемые значения растягивающих напряжений в листах из стали Ст. 3 принимают $\sigma_{s \text{ доп}} = 1500 \text{ кг/см}^2$, из стали Ст. 35 — $\sigma_{s \text{ доп}} = 2000 \text{ кг/см}^2$. В крупных генераторах принимают допускаемые напряжения на 15% больше указанных.

Число стяжных шпилек, приходящееся на стыки сегментов в элементарном обode (рис. 4-9), равно:

$$b_{ш} \vartheta (\mu - 1), \quad (4-48)$$

где $b_{ш}$ — число шпилек, приходящееся на полюсное деление сегмента.

Под действием силы $C_{ш}$ в стяжных шпильках возникает напряжение среза

$$\sigma_t = \frac{4C_{ш}}{b_{ш} \vartheta (\mu - 1) \pi d_{ш}^2}, \text{ кг/см}^2. \quad (4-49)$$

Число шпилек, приходящееся на полюсное деление сегмента, получим из уравнения (4-49), подставив в него $\sigma_t = \sigma_{t \text{ доп}}$,

$$b_{ш} = \frac{4C_{ш}}{\sigma_{t \text{ доп}} \vartheta (\mu - 1) \pi d_{ш}^2}, \quad (4-50)$$

где $d_{ш} = 2,5 \div 4$ см — диаметр шпильки.

В листах сегментов (в местах отверстий под стяжные шпильки) возникают напряжения смятия

$$\sigma_d = \frac{\pi d_{ш}}{4\Delta_c} \sigma_t, \text{ кг/см}^2. \quad (4-51)$$

Допускаемые напряжения для стали Ст. 3 на срез в шпильках $\sigma_{t \text{ доп}} = 750 \text{ кг/см}^2$, для стали Ст. 5 $\sigma_{t \text{ доп}} = 1200 \text{ кг/см}^2$. Допустимые напряжения на смятие в листах обода из стали Ст. 3 $\sigma_{d \text{ доп}} = 3000 \text{ кг/см}^2$.

В случае, если напряжение смятия по (4-51) превышает допустимое, нужно увеличить число шпилек $b_{ш}$ или их диаметр $d_{ш}$.

§ 4-6. РАСЧЕТ МАХОВОГО МОМЕНТА РОТОРА

Маховой момент ротора определяют как сумму маховых моментов полюсов, обода ротора и остова ротора с валом.

Маховой момент полюсов (с обмоткой возбуждения)

$$GD_m^2 = G_{m\text{м}} (2Q_m)^2 \cdot 10^{-3} = 4G_{m\text{м}} Q_m^2 \cdot 10^{-3}, \text{ Тм}^2, \quad (4-52)$$

где $G_{m\text{м}}$ — вес полюсов с обмоткой возбуждения и демферной обмоткой.

Маховой момент обода ротора

$$GD_0^2 = G_0 \frac{D_{a2}^2 + (D'_{a2})^2}{2} \cdot 10^{-3}, \text{ Тм}^2, \quad (4-53)$$

где $G_0 = G_0' + G_{кз}$ — вес обода ротора, $\kappaГ$;
 $D_{a2}' = 2R_1$ — внешний диаметр обода ротора, $м$;
 $D_{a2}' = 2R_1$ — внутренний диаметр обода ротора, $м$.

При расчете махового момента ротора с дисковым ротором, насаженным непосредственно на вал (рис. 4-2), в весе обода ротора следует учесть вес вала на участке посадки обода на вал, а в формуле (4-53) принять $D_{a2}' = 0$, тогда маховой момент ротора с дисковым ободом, насаженным на вал, можно определить по формуле

$$GD_p^2 = GD_m^2 + GD_0^2 = 4G_{mm}Q_m^2 \cdot 10^{-3} + G_0 \frac{D_{a2}^2}{2} 10^{-3}, T M^2. \quad (4-54)$$

При расчете махового момента ротора с дисковым или со спицевым остовом, на который насаживаются обод, следует учесть маховой момент остова с валом, который ориентировочно можно принять равным 7—12% от махового момента обода. Таким образом, маховой момент ротора с дисковым или со спицевым остовом

$$GD_p^2 = 4G_{mm}Q_m^2 \cdot 10^{-3} + k_0 G_0 \frac{D_{a2}^2 + (D_{a2}')^2}{2} 10^{-3}, T M^2, \quad (4-55)$$

где $k_0 = 1,07—1,12$ — коэффициент, учитывающий маховой момент остова с валом.

Маховой момент ротора, рассчитанный по (4-54) или (4-55), не должен быть меньше требуемого минимального махового момента, определенного по (2-1), (2-2). Если это условие не выполняется, то для увеличения махового момента увеличивают размеры обода ротора (утяжеляют обод).

§ 4-7. РАСЧЕТ СТАНИНЫ

Станина гидрогенератора имеет форму кольца. Она выдерживает усилия от собственного веса и веса укрепленного в ней сердечника статора с обмоткой, усилия, возникающие при стягивании нажимными плитами пакета стали сердечника статора, силы одноостороннего магнитного притяжения и силы, которые появляются в результате крепления ее к фундаменту.

Однако механические напряжения от этих усилий в станинах, как правило, невелики, так как решающим фактором при выборе их сечений являются допустимые деформации и связанные с ними собственные частоты колебаний станин. Расчет допустимых деформаций станин сложен, поэтому ниже приведена эмпирическая формула, согласно которой значение необходимого момента инерции одноостороннего сечения кольца станины гидрогенератора, определенное по (4-57), удовлетворяет равенству

$$J \geq k \frac{GR^2}{22500}, \quad (4-56)$$

где G — вес станины, $\kappaГ$;

R — радиус центра тяжести сечения станины, определяемый при помощи y_c по (4-58), $см$;
 $k = 1$ — для машин с горизонтальным валом,
 $k = 0,9$ — для машин с вертикальным валом.

Момент инерции одноостороннего сечения станины определяется в соответствии с рис. 4-10 по формуле

$$J = \sum \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum c_i^2 F_i, \text{ см}^4, \quad (4-57)$$

где h_i и b_i — радиальный и аксиальный размеры i -го элемента станины (станину можно представить состоящей из i простейших элементов прямоугольных сечений), $см$;

c_i — расстояние от центра тяжести i -го элемента до линии MN , проходящей через центр тяжести сечения станины;
 F_i — площадь сечения i -го элемента, $см^2$.

Для определения центра тяжести сечения станины (проведем произвольную линию EF (рис. 4-10), например, по концам полок станины. Тогда центр тяжести сечения будет находиться от линии EF на расстоянии

$$y_c = \frac{\sum y_i F_i}{\sum F_i}, \text{ см}, \quad (4-58)$$

где y_i — расстояние от центра тяжести i -го элемента до линии EF , $см$;

F_i — площадь сечения i -го элемента, $см^2$.

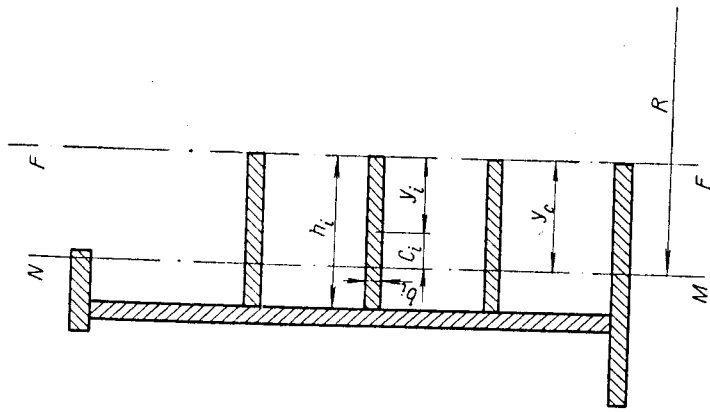


Рис. 4-10. Поперечное сечение станины гидрогенератора

начиться определением теоретического напора полюсов

$$\frac{\gamma}{g}(u_2^2 - u_1^2).$$

Влияние спиц и обода ротора и несовершенства аэродинамической формы всех напорных элементов ротора, включая полюса, учитывают при помощи эмпирического коэффициента μ . Тогда статический напор ротора [5] и [28]

$$H = \mu \frac{\gamma}{g} (u_2^2 - u_1^2), \text{ мм вод. ст.}, \quad (5-2)$$

где $u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$ — окружная скорость на наружном диаметре ротора, м/сек;

$u_1 = \frac{\pi (D_2 - 2h_{mp}) n}{60}$ — окружная скорость на диаметре оснований полюсов, м/сек;

$h_{mp} = h_p + h_m$ — высота полюса, м;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести;

$\gamma = 1,147 \text{ кг/м}^3$ — удельный вес воздуха при 35°С и 760 мм рт. ст. .
Коэффициент μ тем больше, чем совершеннее аэродинамическая форма ротора (чем больше сечение выхода из каналов обода в межполюсное пространство, плавнее переход от одного сечения канала к другому и т. д.).

При отсутствии торцовых вентиляторов и радиальных каналов в обode $\mu = 0,6$. Если имеются торцовые вентиляторы и радиальные каналы в обode, $\mu = 0,7 \div 1,0$ и более.

Для генераторов частоты 50 гц, заметив, что скорость вращения

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p},$$

и выразив диаметры D_2 и $D_2 - 2h_{mp}$ через средний диаметр полюсов $D_m = D_2 - h_{mp}$,

$$D_2 = D_m + h_{mp}, \\ D_2 - 2h_{mp} = D_m - h_{mp},$$

можно представить уравнение (5-2) в иной форме

$$H = \mu \frac{\gamma}{g} k_m \pi \frac{20000}{p} \tau h_{mp}, \quad (5-2a)$$

где

$$k_m = \frac{D_m}{D} = \frac{D_2 - h_{mp}}{D} = \frac{(D_2 - h_{mp}) \pi}{2p \cdot \tau}. \quad (5-3)$$

Аэродинамическое сопротивление вентиляционной цепи гидрогенератора зависит от геометрических размеров воздухопровода

Глава пятая

ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТЫ

§ 5-1. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОГЕНЕРАТОРА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

При вентиляционном расчете определяют общий расход воздуха через генератор, напор, обеспечивающий этот расход, а также скорости омывания воздухом тех частей машины, в которых выделяются потери. Знание этих величин необходимо для определения температур активных частей машины и вычисления расхода мощности на вентиляцию машины.

При замкнутой системе вентиляции, обычно применяемой в гидрогенераторах, необходимый статический напор H вентилятора зависит от расхода воздуха Q ($\text{м}^3/\text{сек}$) (количества воздуха, проходящего за единицу времени через определенное сечение воздухопровода), и его определяют по уравнению

$$H = z_a Q^2, \text{ мм вод. ст.}, \quad (5-1)$$

где z_a — аэродинамическое сопротивление воздухопровода, величина которого зависит от геометрических размеров воздухопровода и от плотности газа, циркулирующего в системе [5].

Величина напора в гидрогенераторе определяется конструкцией и размерами спиц, обода и полюса ротора. В коротких гидрогенераторах с $l_0/\tau \leq 1,5 \div 2,0$ вентиляторы того или иного типа, прикрепляемые к ободу ротора, можно не устанавливать.

В более длинных гидрогенераторах торцовые вентиляторы служат для того, чтобы придать вращательное движение струям воздуха, направляющимся к полюсам, увеличить поступление воздуха в межполюсное пространство и интенсифицировать охлаждение воздухопроводом лобовых частей статора.

Статический напор ротора складывается из напоров, образующихся при движении воздуха между спицами ротора, по каналам в обode ротора и главным образом в пространстве между полюсами. Однако вместо вычисления напора элементов ротора можно огра-

и параметров воздуха, и его определяют по уравнению (5-4)

$$z_a = \frac{\gamma}{2g} \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i}{s_i^2}, \quad (5-4)$$

где s_i — сечение i -го последовательно включенного участка воздухопровода, m^2 ;

ξ_i — коэффициент сопротивления участка с сечением s_i .
Коэффициент

$$\xi_i = \xi_{i1} + \xi_{i2} + \xi_{i3},$$

где $\xi_{i1} = f \left(\frac{s_i}{s_{i-1}} \right)$ — коэффициент сопротивления от изменения площади сечения при переходе от сечения s_{i-1} к сечению s_i ;

$\xi_{i2} = f(\alpha)$ — коэффициент сопротивления от поворота струи без изменения сечения;

ξ_{i3} — коэффициент сопротивления от трения о стенки канала.

Все сечения в уравнении (5-4) удобно представить в относительной форме, приняв за единицу сечение воздушного зазора

$$s_0 = 2\tau l_1 10^4, \text{ м}^2,$$

тогда уравнение (5-4) примет вид

$$z_a = \frac{\gamma}{2gs_0^2} \sum_{i=1}^n \xi_i \left(\frac{s_0}{s_i} \right)^2 = \frac{z_a^*}{(2\tau l_1)^2}, \quad (5-4a)$$

где z_a^* — относительное аэродинамическое сопротивление воздухопровода,

$$z_a^* = \frac{\gamma}{2g} \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i}{s_i} \left(\frac{s_i}{s_0} \right)^2.$$

Выразив в (5-1) z_a по (5-4a) и H по (5-2a), найдем расход воздуха, который может обеспечить вентиляционная система гидрогенератора,

$$Q = k\tau l_1 \sqrt{\rho t h_{mp}}, \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (5-5)$$

где k — коэффициент воздухопровода,

$$k = 500 \sqrt{\frac{\mu \gamma k_m}{g z_a^*}}; \quad (5-6)$$

l_1, τ, h_{mp} — размеры, m .

Подставив значение z_a^* в уравнение (5-6)

$$k = \frac{700 \sqrt{\mu}}{\tau} \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_0}{s_i} \right) \sqrt{\xi_i}, \quad (5-6a)$$

можно заметить, что для определения коэффициента воздухопровода необходимо рассчитать коэффициенты сопротивления и сечения для всех участков сложной разветвленной вентиляционной цепи гидрогенератора, размеры которой (особенно размеры каналов в фундаменте станции) не всегда известны.

Для упрощения задачи аэродинамические сопротивления можно определить только для участков, потери напора в которых наиболее значительны [28]. Такими участками являются радиальные воздушные каналы статора и каналы входа в межполюсное пространство ротора. Для этих участков

$$\sum_{i=c, n} \frac{s_0}{s_i} \sqrt{\xi_i} = \frac{s_0}{s_c} \sqrt{\xi_c} + \frac{s_0}{s_n} \sqrt{\xi_n},$$

где s_c — сечение входа воздуха в радиальные вентиляционные каналы статора, m^2 ;

s_n — суммарное сечение входа воздуха в межполюсное пространство, m^2 ;

ξ_c и ξ_n — коэффициенты сопротивлений участков.

Не учитывая различие между ξ_c и ξ_n и учитывая сопротивление остальных участков при помощи коэффициента k_z , получим выражение для полной суммы сопротивлений вентиляционной цепи гидрогенератора:

$$\sum_{i=1}^n \frac{s_0}{s_i} \sqrt{\xi_i} = k_z \sqrt{\xi_c} \left[\frac{s_0}{s_c} + \frac{s_0}{s_n} \right]. \quad (5-7)$$

Коэффициент $k_z > 1$ в этом уравнении зависит главным образом от относительного сечения воздухоохладителей $\left(\frac{s_{охл}}{s_0} \right)$, аэродинамическое сопротивление которых представляет существенную часть сопротивления гидрогенератора.

Подставив (5-7) в (5-6a), получим окончательно

$$k = \frac{700 \varphi_D}{s_c + \frac{s_0}{s_n}}, \quad (5-8)$$

где $\varphi_D = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\xi_c} k_z}$ — коэффициент добротности вентиляционной системы, зависящий от конструкции статора и ротора (μ, ξ), от относительного

сечения воздухоохладителей (k_2) и от способа подвода охлаждающего воздуха к ротору.

Зависимость коэффициента φ_d от относительного сечения входа в охладители с шестью рядами трубок для схемы вентиляции с двухсторонним подводом воздуха к ротору (рис. 1-4 или 1-56) приведена на рис. 5-1. Верхняя и нижняя пунктирные кривые для коэффициента φ_d соответствуют пределам изменения μ в зависимости от размеров и конструкции вентиляционной системы гидрогенератора.

Для гидрогенератора с совершенной системой вентиляции (скошены клинья паза статора в зоне вентиляционных каналов, установлены направляющие распорки в каналах обода ротора, между полюсами имеется не более одной распорки, осуществлено оптимальное закрытие звезды ротора, установлены воздухоразделяющие щиты) следует брать коэффициент φ_d по верхней пунктирной кривой.

Для определения расхода воздуха по уравнениям (5-5) и (5-8), кроме выбранных в электромагнитном расчете размеров τ , l_1 , h_{mp} и числа пар полюсов p , нужно определить сечения s_c и $s_{\text{охл}}$ [29]. Сечение входа в вентиляционные каналы статора s_c должно составлять около 10% от площади воздушного зазора s_δ . При ширине пакета $l' = 4 \div 4,5$ см, ширине канала $b_b = 1$ см и толщине вентиляционной распорки в радиальном канале статора $b_p = 0,3 \div 0,4$ см это условие обычно удовлетворяется:

$$s_c = [\pi D - z(b_p + b_p)] n_b b_b 10^{-4}, \text{ м}^2, \quad (5-9)$$

где n_b , b_b — число и ширина вентиляционных каналов, см.

Сечение входа в воздухоохладители $s_{\text{охл}}$ должно составлять не менее 40% от площади воздушного зазора s_δ . Скорость воздуха на входе в воздухоохладитель $v_{\text{охл}}$ должна быть тем меньше, чем меньший напор развивает ротор гидрогенератора.

Поскольку напор уменьшается с уменьшением окружной скорости ротора или полюсного деления для определения допустимой скорости $v_{\text{охл}}$ можно рекомендовать формулу

$$v_{\text{охл}} = 0,1 + 0,05\tau, \text{ м/сек}, \quad (5-10)$$

где τ — полюсное деление, см.

Зная $v_{\text{охл}}$ и задавшись требуемым для охлаждения генератора расходом воздуха Q , определенным в § 3-10, можно найти

$$s_{\text{охл}} = \frac{Q}{v_{\text{охл}}}, \text{ м}^2. \quad (5-11)$$

Суммарное сечение входа воздуха в межполюсное пространство должно составлять не менее 10—15% от площади воздушного

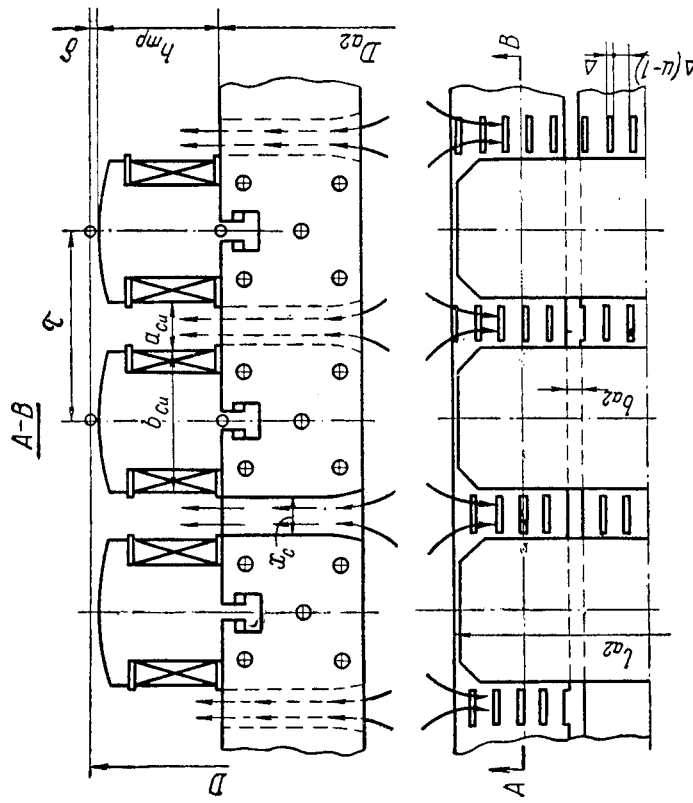


Рис. 5-2. Расчет сечений входа воздуха в межполюсное пространство

зазора. Это сечение определяют как сумму четырех сечений:

$$s_{\text{п}} = s_{\text{п1}} + s_{\text{п2}} + s_{\text{п3}} + s_{\text{п4}}, \text{ м}^2. \quad (5-12)$$

Сечение входа воздуха в межполюсное пространство с торцовых сторон (рис. 5-2, 3-4 и 3-5)

$$s_{\text{п1}} = 4r a_{\text{Cu}} h_{mp} 10^{-4}, \text{ м}^2, \quad (5-13)$$

где a_{Cu} — среднее расстояние между катушками и полюсными наконечниками соседних полюсов, см,

$$a_{\text{Cu}} = \frac{\tau - b_{\text{Cu}}}{2} + \frac{x}{2};$$

x — расстояние между основаниями соседних катушек, см,

$$x = \frac{\pi D_{a2}}{2p} - b_{cu};$$

b_{cu} — ширина катушки возбуждения.

Сечение входа воздуха в воздушный зазор с торцовых сторон (5-14)

$$S_{п2} = 4r\delta 10^{-4}, \text{ м}^2,$$

где τ и δ выражены в см.

Сечение входа в межполюсное пространство через кольцевые каналы в обод ротора шириной $b_{a2} = 3-5$ см (рис. 5-2 и 2-2)

$$S_{п3} = 2rxl_{a2}b_{a2}10^{-4}, \text{ м}^2, \quad (5-15)$$

где l_{a2} — число радиальных каналов.

Число радиальных каналов выбирают возможно большим, но таким, чтобы механические напряжения в ободке при угонной скорости вращения находились в допустимых пределах. При этом необходимо, чтобы суммарная ширина каналов не превышала 10—15% от длины обода

$$b_{a2}l_{a2} \leq (0,1 - 0,15) l_{a2}.$$

Сечение входа в межполюсное пространство через прямоугольные каналы между соседними сегментами обода ротора

$$S_{п4} = 2rx_c\Delta n_{\Delta} 10^{-4}, \text{ м}^2, \quad (5-16)$$

где $x_c \leq x$ — ширина канала между соседними сегментами, см ($x_c \approx 0,7x$);

$\Delta \approx 0,4 - 0,6$ — толщина сегмента, см;

n_{Δ} — число каналов между сегментами, приходящихся на один полюс (см. рис. 5-2),

$$n_{\Delta} = \frac{l_{a2} - n_{a2}b_{a2}}{u_{\Delta}}.$$

Толщину сегмента Δ и u_{Δ} — число слоев в элементарном ободке — выбирают при механическом расчете обода.

Расчет по уравнениям (5-5) и (5-8) совпадает с опытом только в том случае, если сечение каналов для циркуляции воздуха в фундаменте станции и в обшивке корпуса статора выбрано, исходя из того, чтобы скорость воздуха в канале не превышала

$$v_{кан} = 1,0 + 0,085\tau, \text{ м/сек.}$$

При увеличении окружной скорости ротора $v = \tau$ и напора, развиваемого ротором, скорость в каналах, как видно из формулы, можно повысить. Падение напора в каналах, выраженное в долях напора ротора, остается при этом без изменения.

Если расчетный подогрев воздуха (§ 5-2) при определенном расходе воздуха более 25°C или если перегревы меди или стали превышают допустимые пределы, расход воздуха увеличивают. Это можно достичь путем увеличения сечения кольцевых каналов в ободке ротора, что в свою очередь иногда требует увеличения радиальной высоты обода или применения более высококачественной стали для изготовления обода. Тот же эффект получается при увеличении сечения воздухоохладителей.

5-2. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОГЕНЕРАТОРА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Тепловой расчет гидрогенератора производят для определения превышения температуры (перегрева) отдельных частей машины над температурой входящего в машину холодного воздуха.

Для гидрогенераторов с разомкнутой системой вентиляции температура входящего в машину воздуха равна температуре воздуха в машинном зале или температуре наружного воздуха, если воздух подводится к генератору снаружи. Для гидрогенераторов с замкнутой системой вентиляции, в которых циркулирует постоянный объем воздуха, охлаждаемый водой в газоохладителях, температура входящего в машину холодного воздуха зависит от температуры воды, поступающей в газоохладитель, и от его параметров. Согласно ГОСТу 183—55 температура входящего в машину воздуха не превышает 35°C . Поэтому независимо от конкретных условий эксплуатации гидрогенератора температуру входящего в машину воздуха принимают равной 35°C .

Чем больше нагрузка генератора, тем больше потери в нем и тем выше при прочих равных условиях перегрев его частей. Допуская большие перегревы, можно увеличить мощность генератора, сохранив его размеры.

Как правило, обмотка статора современных гидрогенераторов имеет компаундированную изоляцию класса В, изготовленную из слюды, асбеста, стекловолокна или других неорганических материалов и пропитанную особым асфальто-битумным составом (компаундом). Температура размягчения компаунда не ниже $115-120^{\circ}\text{C}$. Обмотки ротора изолируют материалами класса В (микафолием и асбестовой бумагой), связанными органическими лаками.

Превышение температуры активных частей гидрогенератора над температурой входящего (холодного) воздуха при номинальной нагрузке, согласно ГОСТу 5616—50, не больше значений, указанных в табл. 5-1.

При этом следует иметь в виду, что согласно стандартам (ГОСТ 183—55, 5616—50) под температурой обмотки статора понимают температуру, измеренную при помощи термометров, заложенных между верхним и нижним слоем этой обмотки в наиболее горя-

чих точках, под температурой ротора — среднюю температуру обмотки возбуждения, рассчитанную по изменению ее электрического сопротивления.

Таблица 5-1

Активные части гидрогенератора	Допускаемые превышения температуры (°C) над температурой холодного воздуха 35° C
Обмотка статора	70
Обмотка ротора	95
Активная часть статора	70

Поскольку поток тепла и перепад температуры между проводящими верхнего и нижнего слоев обмотки практически равен нулю, измеренная указанным способом температура обмотки статора близка к температуре проводов обмотки.

Нагревание активных частей машины происходит вследствие потерь энергии в этих частях. Движение тепла (или тепловой энергии) направлено от более нагретого тела, имеющего температуру θ_1 , к менее нагретому, имеющему температуру θ_2 . Если при этом тепло движется через однородное вещество в одном направлении от стенки с температурой θ_1 к стенке с температурой θ_2 при расстоянии между стенками d см, то можно написать:

$$P = \lambda (\theta_1 - \theta_2) \frac{1}{d}, \text{ вт}, \text{ см}^2, \quad (5-17)$$

где P — удельный тепловой поток;

λ — удельная теплопроводность, $\text{вт/см}^2 \cdot \text{°C}$.

По (5-17) можно определить температурный перепад, например, в лазовой изоляции:

$$\theta_1 = (\theta_1 - \theta_2) = P \frac{d}{\lambda}, \text{ °C}. \quad (5-18)$$

Лазовая изоляция состоит из нескольких слоев, поэтому здесь под λ понимают эквивалентную удельную теплопроводность этой изоляции.

Если в равенство (5-18) вместо удельного теплового потока P подставить полный тепловой поток $P = ps$ (вт) через площадь s (см^2), то получим:

$$\theta_1 = (\theta_1 - \theta_2) = P \frac{d}{\lambda s} = PR_T, \text{ °C}. \quad (5-19)$$

Величину $R_T = \frac{d}{\lambda s} \left(\frac{\text{°C}}{\text{вт}} \right)$ называют *тепловым сопротивлением*.

Для случая перехода тепла с нагретой поверхности к охлаждающему газу можем написать:

$$\theta_a = p \frac{1}{\alpha s} = p R_T, \text{ °C}, \quad (5-20)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, $\text{вт/см}^2 \cdot \text{°C}$.

Здесь θ_a — температурный перепад;

$R_T = \frac{1}{\alpha s}$ — тепловое сопротивление при переходе тепла с нагретой поверхности к охлаждающему газу, °C/вт .

Используя приведенные соотношения, можно начертить тепловые схемы замещения для отдельных частей машины. Эти схемы позволяют составлять расчетные формулы для определения исковых превышений температуры.

Определение превышения температуры обмотки и сердечника статора

Расчет установившихся превышений температуры обмотки θ_{Cu} и сердечника θ_{Fe} статора производят для среднего (наиболее нагретого) пакета статора.

Потери в обмотке на протяжении пакетного деления ($l_1 + b_b$) равны:

$$P_{\text{Cu}} = \frac{(P_{\text{эл5}} + P_{\text{эд}})(l_1 + b_b)}{l_{\text{ср}}}, \text{ вт}, \quad (5-21)$$

где $l_{\text{ср}}$ — длина полувитка обмотки статора (§ 3-8), см ;

$P_{\text{эл5}}$ и $P_{\text{эд}}$ — основные и добавочные потери в обмотке статора (§ 3-10), квт .

Потери в сердечнике статора (на пакетном делении)

$$P'_{\text{Fe}} = \frac{P_m + P_{\text{кз}}}{n_B + 1} 10^3, \text{ вт}, \quad (5-22)$$

где $n + 1$ — число пакетов сердечника статора,

P_m и $P_{\text{кз}}$ — основные и добавочные потери в сердечнике статора, квт .

Ввиду высокой теплопроводности медной обмотки и стального сердечника можно считать, что на протяжении одного пакетного деления ($l_1 + b_b$) превышения температуры обмотки и сердечника над температурой входящего воздуха постоянны и равны соответственно θ_{Cu} и θ_{Fe} .

Кроме того, полагая, что соседние пакеты находятся в аналогичных условиях, пренебрежем перемещением тепла к соседним пакетным делениям. Тогда все тепло, выделившееся в обмотке P_{Cu} и сердечнике P'_{Fe} пакетного деления, будет передано охлаждающему воздуху, перегретому в среднем на θ_{T} , через поверхность пакетного деления (рис. 5-3).

Тепло, выделившееся в обмотке (P'_{Cu}), передается через изоляцию обмотки двумя путями:

а) через последовательно включенные тепловое сопротивление корпусной изоляции в пределах вентиляционного канала R_I и тепловое сопротивление при переходе тепла с поверхности изоляции обмотки в вентиляционном канале к охлаждающему воздуху R_{II} (потери P_I);

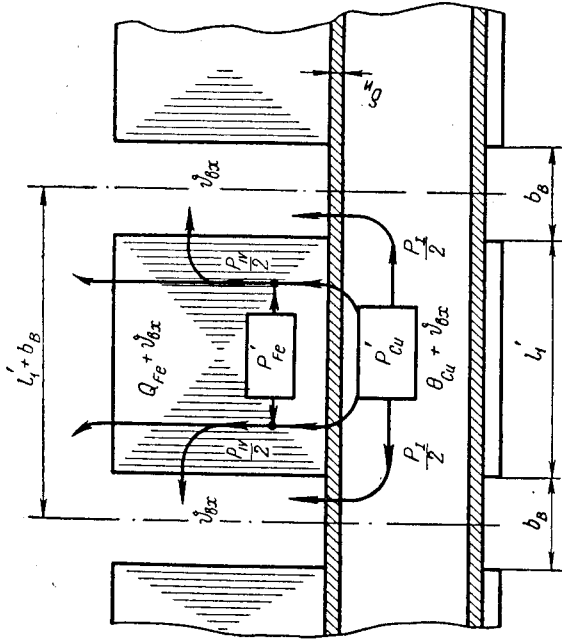


Рис. 5-3. Пакет статора с обмоткой

б) через тепловое сопротивление корпусной изоляции в пределах пакета R_{III} стали сердечника (часть потерь $P_{III} = P'_{Cu} - P_I$). Тепло P'_{Fe} , выделившееся в сердечнике, и тепло P_{III} , перешедшее в сердечник от обмотки, передается охлаждающему воздуху через тепловые сопротивления $R_{1п}$, $R_{2п}$ и $R_{3п}$, соответствующие наружной поверхности яра сердечника, торцовой поверхности сердечника, обращенной к вентиляционным каналам, и поверхности зубцов сердечника, обращенной к зазору.

Тепловая схема замещения пакетного деления, соответствующая принятому перемещению тепла, показана на рис. 5-4, на котором даны те же обозначения, что и на рис. 5-3.

Сопротивления схемы замещения выражаются через размеры пакетного деления, теплопроводность изоляции и коэффициенты теплопередачи.

Тепловое сопротивление изоляции в вентиляционном канале (при переходе тепла от проводов обмотки к наружной поверхности

изоляции)

$$R_I = \frac{\delta_{и}}{\lambda b \Pi_{п}}, \quad \text{°C/вт}, \quad (5-23)$$

где $\delta_{и}$ — односторонняя толщина изоляции, (§ 3-2), см;

$\Pi_{п}$ — периметр для определения поверхности поверхности охлаждения обмотки в вентиляционном канале, см,

$$\Pi_{п} = 2z (l_{п} - l_{кл});$$

$\lambda = 0,0016$ — теплопроводность компаундированной микалентной изоляции, вт/см °C.

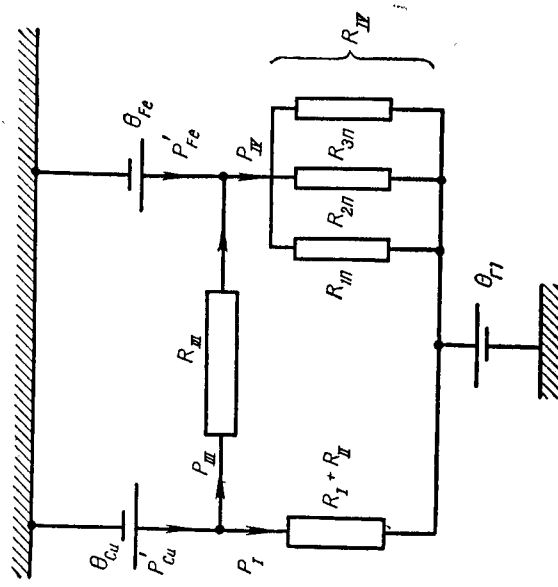


Рис. 5-4. Тепловая схема замещения пакетного деления

Тепловое сопротивление при переходе тепла с поверхности изоляции обмотки в вентиляционном канале

$$R_{II} = \frac{1}{\alpha_{в1} b_{в1} \Pi_{п}}, \quad \text{°C/вт}. \quad (5-24)$$

Коэффициент теплоотдачи в зубцовой зоне вентиляционного канала

$$\alpha_{в1} = 1,33 (1 + \sqrt{v_{в1}}) 10^{-3}, \quad \text{вт/см}^2 \text{°C}, \quad (5-25)$$

где $v_{в1}$ — скорость воздуха в зубцовой зоне вентиляционных каналов статора, м/сек,

$$v_{в1} = \frac{Q}{S_1};$$

s_c — среднее сечение вентиляционных каналов в зубцовой зоне, m^2 ,

$$s_c = [\pi(D + h_n) - z(b_n + b_p)] n_v b_B 10^{-4}.$$

Расход воздуха Q ($m^3/сек$) и толщина вентиляционной распорки b_p ($см$) должны быть взяты из вентиляционного расчета.

Скорость воздуха $v_{в1}$ в правильном спроектированном гидротермостате

$$v_{в1} \approx 0,16\tau, \text{ м/сек},$$

где τ — полюсное деление, $см$.

Тепловое сопротивление пазовой изоляции в пределах пакета

$$R_{III} = \frac{\delta_n}{\lambda_1 \Pi_n}, \text{ } ^\circ C/вт. \quad (5-26)$$

Тепловые сопротивления при переходе тепла с охлаждаемых поверхностей пакета к омывающему их воздуху $R_{1п}$, $R_{2п}$ и $R_{3п}$ соединены параллельно. Их можно заменить эквивалентным сопротивлением R_{IV}

$$R_{IV} = \frac{1}{\frac{1}{R_{1п}} + \frac{1}{R_{2п}} + \frac{1}{R_{3п}}}. \quad (5-27)$$

Как показывают расчеты и экспериментальные исследования действующих генераторов [29], несмотря на неодинаковую теплопроводность вдоль и поперек пакета (теплопроводность при перемещении тепла поперек пакета к поверхности канала меньше, чем теплопроводность вдоль пакета) 75—80% тепла переходит из пакета в воздух вентиляционного канала (через сопротивление $R_{2п}$) и только 20—25% — в воздух зазора и воздух, омывающий сталь статора снаружи (через сопротивление $R_{1п}$ и $R_{3п}$). Поэтому сопротивление R_{IV} можно выразить через сопротивление $R_{2п}$, учитывая влияние $R_{1п}$ и $R_{3п}$ при помощи коэффициента 0,78 = $\frac{0,75 + 0,80}{2}$:

$$R_{IV} = 0,78 R_{2п}, \text{ } ^\circ C/вт. \quad (5-27a)$$

где $R_{2п} = \frac{1}{\alpha'_{в1} s_2}$;

s_2 — торцовая поверхность охлаждения пакета в вентиляционных каналах, $см^2$,

$$s_2 = 2 [0,785(D_a^2 - D^2) - b_n h_n z];$$

$\alpha'_{в1}$ — средний коэффициент теплоотдачи торцовой поверхности охлаждения пакета,

$$\alpha'_{в1} = 1,67(1 + \sqrt{v_{в1}}) 10^{-3}.$$

Теперь, в соответствии с тепловой схемой замещения (рис. 5-4), рассматривая перегревы как э. д. с. и тепловые потоки (потери) как токи, можно составить уравнения для определения максимальных превышений температуры обмотки и сердечника статора (без учета аксиального течения тепла по обмотке за пределы пакетного деления).

Если выразить тепловые потоки P_{III} и P_{IV} через тепловые потоки P'_{Cu} , P'_{Fe} и P_I

$$P_{III} = P'_{Cu} - P_I,$$

$$P_{IV} = P'_{Fe} + P'_{Cu} - P_I,$$

то тепловой поток P_I можно найти из уравнения «напряжений» (температур) для контура R_I , R_{II} , R_{III} , R_{IV}

$$P_I = \frac{P'_{Cu} R_{III} + (P'_{Fe} + P'_{Cu}) R_{IV}}{R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV}}.$$

После этого превышения температуры θ_{Cu} и θ_{Fe} можно определить из уравнений температур для ветвей θ_{Cu} ; R_I ; R_{II} ; θ_{Fe} ; R_{IV} ; θ_{Fe}

$$\theta_{Cu} = \frac{(R_I + R_{II}) [P'_{Cu} (R_{III} + R_{IV}) + P'_{Fe} R_{IV}] + \theta_{Fe}}{R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV}}, \text{ } ^\circ C, \quad (5-28)$$

$$\theta_{Fe} = \frac{R_{IV} [(R_I + R_{II}) (P'_{Fe} + P'_{Cu}) + P'_{Fe} R_{III}] + \theta_{Cu}}{R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV}}, \text{ } ^\circ C. \quad (5-29)$$

Охлаждающий воздух попадает в вентиляционные каналы статора после того, как он пройдет мимо обмотки возбуждения и полюсных башмаков и подогреется, охлаждая эти части ротора.

Температура охлаждающего воздуха по высоте вентиляционных каналов также повышается с удалением от воздушного зазора. Поэтому при определении превышений температуры обмотки и сердечника статора над температурой входящего воздуха в расчетные формулы вводят среднее превышение температуры воздуха в вентиляционном канале статора

$$\theta_{r1} = \frac{P_{в(75)} + P_v + P_p}{1,1Q} + 0,5 \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{1,1Q}, \text{ } ^\circ C, \quad (5-30)$$

где $P_{в(75)}$ — потери в обмотке возбуждения без учета потерь в возбудителе, $квт$;

P_v — вентиляционные потери, $квт$;

P_p — потери в полюсных башмаках (см. § 3-10), $квт$.

Среднее превышение температуры воздуха в вентиляционном канале статора обычно не превышает в гидротермостатах $25^\circ C$.

Определение превышения температуры обмотки возбуждения

Для упрощения расчета пренебрежем незначительным изменением температуры обмотки по длине, высоте и ширине катушки. Примем, что температура меди катушки одинакова для всех ее частей. Тогда переток тепла от одного элемента длины витка к другому будет отсутствовать, и все потери, выделяющиеся в элементе длины витка катушки, будут уноситься охлаждающим воздухом с его поверхности.

Превышение температуры элемента витка обмотки сечением s_v ($мм^2$) и длиной $l = 0,01$ м над температурой охлаждающего воздуха

$$\theta'_v = P'_v R_v, \quad ^\circ C, \quad (5-31)$$

где P'_v — потери в рассматриваемом элементе, $вт$,

$$P'_v = I_v^2 r'_v = \Delta_{sv}^2 \frac{\rho \cdot l}{s_v} = 0,218 \Delta_{sv}^2 \rho \cdot 10^{-3},$$

r'_v — омическое сопротивление элемента при температуре $75^\circ C$; Δ_{sv} — плотность тока в обмотке возбуждения, $а/мм^2$; R_v — тепловое сопротивление при переходе тепла с изолированной поверхности элемента в воздух междуполюсного пространства (потоком тепла через воздушный зазор и изоляцию в сторону полюса можно пренебречь),

$$R_v = \frac{l}{\alpha_{sv} s_{sv}}, \quad ^\circ C/вт.$$

Поверхность охлаждения элемента s_{sv} зависит от формы профиля меди.

Для витка прямоугольного профиля (рис. 3-14, а)

$$s_{sv} = a_s, \quad см^2.$$

Для витка с профилем (рис. 3-14, б)

$$s_{sv} = 2a_s, \quad см^2.$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности элемента

$$\alpha_{sv} = 1,67 (1 + \sqrt{v_{sv}}) 10^{-3}, \quad вт/см^2 \quad ^\circ C,$$

где $v_{sv} \approx 1,25 v_{B1}$ — средняя скорость воздуха в межполюсном пространстве, $м/сек$.

Скорость v_{sv} составляет около $0,2$ т (где т, см).

Омывающий обмотку возбуждения воздух подогревается потерями в обмотке и вентиляционными потерями. Поэтому среднее превышение температуры воздуха в межполюсном пространстве

$$\theta_{sv} = \frac{0,5(P_v + P_{sv})}{1,1Q}, \quad ^\circ C. \quad (5-32)$$

Превышение температуры обмотки ротора над температурой входящего воздуха θ_v складывается из превышения температуры воздуха θ_{r2} и превышения температуры обмотки ротора над охлаждающим воздухом θ'_v

$$\theta_v = \theta'_v + \theta_{r2}. \quad (5-33)$$

Рассчитанные по уравнениям (5-28), (5-29) и (5-33) превышения температуры статора и ротора не должны превышать допустимых значений (табл. 5-1).

Если допустимые значения превышены, следует повысить расход охлаждающего воздуха. Если и это не позволит снизить перегревы, необходимо изменить размеры или конструкцию обмоток или сердечника статора.

Для снижения перегрева обмотки возбуждения следует уменьшить плотность тока в обмотке путем увеличения высоты катушки. Тот же эффект можно получить путем применения форсированного охлаждения обмотки возбуждения.

Перегрев меди статора можно понизить путем сужения паза статора, перехода на более низкое напряжение или снижения плотности тока. Тот же результат можно получить при увеличении числа вентиляционных каналов в сердечнике статора. Кроме того, можно снизить электромагнитные нагрузки (A и $B_{\delta n}$) и увеличить основные размеры гидрогенератора.

§ 5-3. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОГЕНЕРАТОРА СО СМЕШАНЫМ ВНУТРЕННИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Рассмотрим тепловой расчет наиболее разработанного варианта гидрогенератора с внутренним охлаждением, в котором для охлаждения обмотки статора используют дистиллированную воду. Сердечник статора и обмотка ротора охлаждаются воздухом. Для обмотки ротора применена поперечная схема охлаждения (см. § 1-22).

Тепловой и гидравлический расчеты системы охлаждения обмотки статора

При выборе схемы соединения стержней обмотки для воды необходимо максимально включить ее упрощение. Для этого по воде нужно последовательно включить наибольшее число стержней, уменьшив тем самым число вводов воды в обмотку. Скорость движения воды в каналах обмотки для получения устойчивого турбулентного движения должна быть больше 1 м/сек. При этом условии коэффициент теплопередачи от проводника к воде получается настолько высоким, что температура провода отличается от температуры воды менее чем на $1^\circ C$. Увеличивать скорость движения воды свыше $1,5$ м/сек и длину последовательно включенных проводов свыше $25-30$ м нецелесообразно из-за чрезмерного увеличения необходимого для

циркуляции воды гидравлического напора. Температуру охлаждающей воды можно принять 30° С. Увеличение температуры воды 0 при охлаждении обмотки рекомендуется взять ~20—25°, так как при временном прекращении подачи воды машина должна иметь возможность работать некоторое время до закипания воды. Задав шись умеренной скоростью движения воды в канале $v = 1,25$ м/сек, можно найти максимально допустимую длину последовательно соединенных по воде стержней при средней температуре обмотки 45°:

$$l_{\max} = \frac{215\theta\mu}{\Delta_a^2 (1-\mu)}, \text{ м}, \quad (5-34)$$

где Δ_a — эквивалентная плотность тока в обмотке, а/мм²,

$$\Delta_a = \Delta \sqrt{k_r};$$

k_r — коэффициент увеличения сопротивления переменному току (см. § 3-8, расчет r_a);
 μ — доля общего сечения провода, занятая каналами для воды (§ 3-2 и рис. 1-60),

$$\mu = \frac{a_0 b_0 c_{\text{эл}}}{b_0 (a_{\text{эл}} c_{\text{эл}} + a_{\text{ос}} c_{\text{ос}})}.$$

Для того чтобы ввод и вывод воды были на одной стороне (см. § 1-22), число последовательно соединенных по воде стержней $n_{\text{ст}}$ длиной $l_{\text{ср}}$ должно быть четным

$$n_{\text{ст}} = \frac{l_{\max}}{l_{\text{ср}}} = k,$$

где k — четное число.

Для удовлетворения этого условия можно скорректировать значения v и θ в рекомендуемых пределах.

Максимальное превышение температуры над температурой входящей воды будет иметь сплошной проводник в зоне выхода воды из обмотки

$$\theta_{\text{си макс}} = \theta + \theta_{\text{пв}} + \theta_{\text{ст}}, \quad (5-35)$$

где $\theta_{\text{пв}} \approx 1^\circ$ — превышение температуры полого проводника над температурой воды;

$\theta_{\text{ст}} = 0,07\Delta_a^2$ — превышение температуры сплошного проводника над температурой полого (формула одинаково пригодна для вариантов с двумя и одним сплошными проводниками на один полюс, так как в первом случае полярный проводник не изолируется).

Среднее превышение температуры сплошного проводника

$$\theta_{\text{си}} = 0,5\theta + \theta_{\text{пв}} + \theta_{\text{ст}}. \quad (5-36)$$

Напор, необходимый для циркуляции воды в обмотке, включая условно потери давления на входе и выходе из стержней в величину

гидравлического сопротивления трения, можно определить по уравнению (5-37)

$$H = 3,6 \frac{v^2 l_{\max}}{d}, \text{ кг/см}^2, \quad (5-37)$$

где d — гидравлический диаметр канала, мм,

$$d = \frac{4a_0 b_0}{2(a_0 + b_0)}.$$

Напор H не должен превышать 5 кг/см².

Тепловой расчет обмотки возбуждения с поперечным внутренним охлаждением

Температуру обмотки возбуждения с внутренним поперечным охлаждением можно определить с достаточной точностью без проведения подробного вентиляционного расчета. Как показали проведенные эксперименты и расчеты, через поперечные каналы в обмотке проходит примерно половина общего расхода воздуха в генераторе.

Общий расход воздуха для генератора этого типа определен в § 3-10. Расход воздуха через каналы ротора

$$Q_{\text{к}} = 0,5Q, \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Общее сечение поперечных каналов на весь генератор (рис. 1-65, § 3-7)

$$2ra_0 l_{\text{в}} w_{\text{в}}, \text{ м}^2.$$

Скорость воздуха в каналах

$$v_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{2ra_0 l_{\text{в}} w_{\text{в}}}, \text{ м/сек}.$$

Коэффициент теплопередачи в воздух канала

$$\alpha_{\text{к}} = 1,33 \cdot 10^{-3} (1 + 1,3 \sqrt{v_{\text{к}}}), \text{ вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{С}.$$

Коэффициент теплопередачи с внутренней и наружной поверхности катушки

$$\alpha_{\text{вн}} \approx 0,7\alpha_{\text{к}}.$$

Ширина канала

$$l_0 \approx 0,1 l_{\text{м}}, \text{ см}.$$

Число каналов в одном витке

$$n_{\text{к}} = \frac{2l_{\text{в}}}{2l_0}.$$

Поверхность каналов (на весь генератор)

$$s_{\text{к}} = 4r w_{\text{в}} n_{\text{к}} b_0 (a_0 + l_0), \text{ см}^2.$$

Внутренняя и наружная поверхности катушки (на весь генератор)

$$s_{вн} = 6,8 \rho l_{в} w_{в} a_{\phi}, \text{ см}^2.$$

Сопротивление тепловому потоку в сторону каналов

$$R_{к} = \frac{1}{\alpha_{к} s_{к}}.$$

Сопротивление тепловому потоку в сторону внутренней и наружной поверхностей катушек

$$R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн} s_{вн}}.$$

Тепловое сопротивление полному потоку

$$R_0 = \frac{R_{вн} R_{к}}{R_{вн} + R_{к}}.$$

Превышение температуры обмотки над средней температурой воздуха в канале

$$\theta'_{в} = P_{в} R_0, \text{ } ^\circ \text{C},$$

где $P_{в}$ выражено в *вт*.

Потери, удаляемые в сторону канала,

$$P_{вк} = \frac{\theta'_{в}}{R_{к}}.$$

Средний перегрев воздуха в каналах

$$\theta_{к} = \frac{0,5 P_{вк}}{1,1 Q_{к}}.$$

Превышение температуры обмотки над температурой входящего воздуха

$$\theta_{в} = \theta'_{в} + \theta_{к}.$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

§ 6-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

Задание на проект (§ 2-1)

Номинальная кажущаяся мощность гидрогенератора	$S_{н} = 26\,200 \text{ кв}a$
Номинальное линейное напряжение	$U_{нл} = 10,5 \text{ кв}$
Номинальный коэффициент мощности	$\cos \varphi_{н} = 0,8$
Число фаз	$m = 3$
Сопряжение фаз	Звезда
Частота тока	$f = 50 \text{ гц}$
Скорость вращения	$n_{н} = 125 \text{ об/мин}$
Кратность угонной скорости вращения	$k_{уг} = 2,24$
Индуктивное сопротивление по продольной оси	$x_d = 0,75$
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси	$x'_d = 0,3$
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси	$x''_d = 0,2$
Тип успокоительной обмотки	Полная продольно-поперечная
Постоянная инерция вращающихся частей генератора	$T_J = 6 \text{ сек}$
Тип приводного двигателя	Поворотная гидравлическая турбина
Исполнение генератора	Вертикальное, закрытое, с замкнутой системой вентиляции

Возбуждение осуществляется от генератора постоянного тока, сопряженного с валом генератора.

Примечание. Проектируемый гидрогенератор должен удовлетворять ГОСТу 183—55 и ГОСТу 5616—50 (см. § 2-1).

Выбор основных размеров (§ 2-2)

Номинальное фазное напряжение (при соединении звездой)

$$U_{н} = \frac{U_{нл}}{\sqrt{3}} = \frac{10\,500}{\sqrt{3}} = 6060 \text{ в}.$$

Номинальный фазный ток

$$I_n = \frac{S_n 10^3}{3U_n} = \frac{26200 \cdot 10^3}{3 \cdot 6060} = 1440 \text{ а.}$$

Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{125} = 24.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора (предварительно)

$$x_{\sigma}^* = 0,42x_d^* = 0,42 \cdot 0,3 = 0,126.$$

Э. д. с., индуцированная магнитным потоком взаимной индукции при номинальной нагрузке (предварительно),

$$E_{\delta n} = k_E U_n = 1,08 \cdot 6060 = 6550 \text{ в,}$$

где

$$k_E = \sqrt{1 + x_{\sigma}^* (2 \sin \varphi_n + x_{\sigma}^*)} = \sqrt{1 + 0,126(2 \cdot 0,6 + 0,126)} = 1,08.$$

Расчетная мощность

$$S_p = 3E_{\delta n} I_n 10^{-3} = 3 \cdot 6550 \cdot 1440 \cdot 10^{-3} = 28300 \text{ кВа.}$$

Полусное деление (предварительно по табл. 2-2)

$$\tau = 45 \text{ см}$$

$$\left(\text{при } \frac{s_n}{2p} = \frac{26200}{48} = 550 \text{ кВа} \right).$$

Машинная постоянная (предварительно по табл. 2-2)

$$c_A = 19,4 \cdot 10^4.$$

Требуемый маховой момент вращающихся частей генератора (по § 2-1)

$$GD_p^2 = \frac{T_J S_n}{\pi^2} \left(\frac{60}{n} \right)^2 = \frac{6 \cdot 26200}{\pi^2} \left(\frac{60}{125} \right)^2 = 3670 \text{ тм}^2.$$

Внутренний диаметр сердечника статора:

$$D = 465 \sqrt[3]{\left(\frac{10^4 n}{\beta c_A} \right)^2 \left(\frac{10GD_p^2}{S_p} \right)^2} = 465 \sqrt[3]{\left(\frac{10^4 \cdot 125}{5,2 \cdot 19,4 \cdot 10^4} \right)^2 \left(\frac{10 \cdot 3670}{28300} \right)^2} = 635 \text{ см.}$$

Округляя, возьмем $D = 650 \text{ см.}$

Полусное деление мало отличается от того, которым задались по табл. 2-2.

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 650}{48} = 42,5 \text{ см.}$$

Угонная скорость на наружной поверхности не превышает допустимых значений

$$v_{уг} = k_{уг} v_n = k_{уг} \tau = 2,24 \cdot 42,5 = 95,2 \text{ м/сек.}$$

Линейная нагрузка (предварительно по табл. 2-1)

$$A = 550 \text{ а/см.}$$

Индукция в зазоре при номинальной нагрузке

$$B_{\delta n} = 8300 \text{ эс.}$$

Расчетная длина (предварительно)

$$l_{\delta} = \frac{6,1 \cdot 10^{11} S_p}{k_0 \alpha_0 k_B A B_{\delta n} n D^2} = \frac{6,1 \cdot 10^{11} \cdot 28300}{0,92 \cdot 0,733 \cdot 550 \cdot 8300 \cdot 125 \cdot 650^2} = 106 \text{ см}$$

(предварительно $k_0 = 0,92$, $\alpha_0 k_B = 0,733$ по табл. 2-1).

Выбор типа обмотки и числа пазов статора (§ 3-1)

Выбираем двухслойную стержневую волновую обмотку с двумя эффективными проводниками в пазу с дробным числом пазов на полюс и фазу (фазный ток $I_n = 1440 \text{ а} > 1000 \text{ а}$, номинальное напряжение $U_{нл} = 10,5 \text{ кВ} > 6 \text{ кВ}$).

Число последовательных витков фазы (предварительно)

$$\omega = \frac{k_E U_n 10^8}{4k_0 \alpha_0 k_B n \tau l_{\delta} B_{\delta n}} = \frac{1,08 \cdot 6060 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,92 \cdot 0,733 \cdot 50 \cdot 42,5 \cdot 106 \cdot 8300} = 130.$$

Число эффективных проводов в пазу

$$u_n = 2.$$

Число параллельных ветвей (табл. 3-1)

$$\frac{u_n I_n}{I_{n \text{ мин}}} > a = \frac{u_n I_n}{I_{n \text{ макс}}},$$

$$\frac{2 \cdot 1440}{2700} = 1,07 > a > \frac{2 \cdot 1440}{3300} = 0,87;$$

принимаем $a = 1$.

Ток паза статора

$$I_n = u_n I_n \frac{1}{a} = 2 \cdot 1440 = 2880 \text{ а.}$$

Число пазов на полюс и фазу (предварительно)

$$q \approx \frac{a}{u_n} \frac{\omega}{p} = \frac{130}{2 \cdot 24} = 2,7.$$

Знаменатель правильной несократимой дроби числа q (по уравнениям (3-6), (3-7))

$$d = \frac{2p}{ka} = \frac{48}{k} = 2, 4, 8, 16, \dots,$$

где k — целое число.

Правильная несократимая дробь в числе q (из условия (3-8) приблизительно равна 0,7, дробной части q :

$$\frac{c}{d} = \frac{5}{8} \text{ или } \frac{11}{16} \approx 0,7.$$

Число пазов статора (предварительно)

$$z = 6pq = 6 \cdot 24 \left(2 \frac{5}{8} \text{ или } 2 \frac{11}{16} \right) = 378 \text{ или } 387.$$

Число частей статора (табл. 3-2)

$$c = 4.$$

При четном числе частей статора число пазов также должно быть четным, поэтому $z = 387$ взять нельзя.

Число пазов статора и число пазов на полюс и фазу (окончательно)

$$z = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 7 = 378,$$

$$q = b + \frac{c}{d} = 2 + \frac{5}{8}.$$

Число пазов в сегменте

$$z_c = \frac{z}{c \text{ (п. ч.)}} = 7 \text{ (или 9)}.$$

Наружный диаметр сердечника статора (предварительно)

$$D_a \approx D + \tau = 650 + 42,5 = 692,5 \text{ см.}$$

Большая хорда сегмента

$$H_c = D_a \frac{\pi z_c}{z} = 692,5 \frac{\pi}{378} \text{ (7 или 9)} = 40,3 \text{ или } 51,8 \text{ см.}$$

Число пазов в сегменте (окончательно). Имея в виду лучшее использование листа стали при $H_c = 40,3$, принимаем

$$z_c = 7.$$

Число последовательных витков фазы

$$\omega = \frac{q u_{\text{пф}}}{a} = \frac{21 \cdot 2 \cdot 24}{8 \cdot 1} = 126.$$

Шаг обмотки (в пазах)

$$y \approx 0,83 \tau = 0,83 \cdot 7,88 = 7,$$

где полюсное деление (в пазах)

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{378}{48} = 7,88.$$

Обмоточный коэффициент статора

$$k_0 = k_p k_y = \frac{\sin 30^\circ}{(bd+c) \sin \frac{30}{bd+c}} \sin \frac{y}{\tau} \sin \frac{y}{\tau} 90^\circ =$$

$$= \frac{0,5}{(2 \cdot 8 + 5) \sin \frac{30^\circ}{7,88}} \sin \frac{7}{7,88} 90^\circ = 0,955 \cdot 0,984 = 0,94.$$

Индукция в воздушном зазоре при номинальной нагрузке (во втором приближении)

$$B_{\delta \text{н}} = \frac{k_p U_{\text{н}} 10^8}{4 k_B \alpha_0 f k_0 \tau l_{\delta \omega}} = \frac{1,08 \cdot 6060 \cdot 10^8}{4 \cdot 0,733 \cdot 50 \cdot 0,94 \cdot 42,5 \cdot 106 \cdot 126} = 8360 \text{ гс.}$$

Линейная нагрузка (окончательно)

$$A = \frac{6 \omega / \text{н}}{\pi D} = \frac{6 \cdot 126 \cdot 1440}{\pi \cdot 650} = 533 \text{ а/см.}$$

Выбор размеров паза статора (§ 3-2)

Зубцовое деление

$$t_z = \frac{\pi D}{z} = \frac{\pi \cdot 650}{378} = 5,41 \text{ см.}$$

Ширина зубца в наиболее узком месте

$$b'_z \geq 1,32 t_z \frac{B_{\delta \text{н}}}{B_z} = 1,32 \cdot 5,41 \frac{8360}{19000} = 3,14 \text{ см.}$$

Ширина паза

$$b_{\text{п}} = (0,4 - 0,5) t_z = (0,4 - 0,5) 5,41 = 2,15 - 2,7 \text{ см;}$$

$$b_{\text{п}} \leq t_z - b'_z - \Delta b = 5,41 - 3,14 - 0,06 = 2,21 \text{ см;}$$

$$b_{\text{п}} = 2,1 - 2,7 \text{ см (по табл. 3-3).}$$

Принимаем (предварительно)

$$b_{\text{п}} = 2,27 \text{ см.}$$

Плотность тока в обмотке статора (предварительно по табл. 3-4)

$$\Delta = \frac{(\Delta A)}{A} = \frac{1570}{533} = 2,95 \text{ а/мм}^2.$$

Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$s = \frac{I_{\text{н}}}{a \cdot \Delta} = \frac{1440}{1 \cdot 2,95} = 488 \text{ мм}^2.$$

Высота элементарного проводника стержня (по табл. П1-1)

$$a_0 = 0,244 \text{ см.}$$

Суммарная ширина изолированных проводников по ширине паза

$$b_0 = b_{\text{п}} - 2\delta_{\text{п}} = 2,27 - 1,08 = 1,19 \text{ см.}$$

Ширина элементарного проводника стержня

$$b_3 = b_{II} - \Delta_{II} = \frac{b_0}{n_3} - \Delta_{II} = \frac{1,19}{2} - 0,04 = 0,555,$$

где $n_3 = 2$ — число проводников по ширине паза, $\Delta_{II} = 0,04$ — толщина изоляции провода марки ПДА на две стороны (по табл. П1-3).

По табл. П1-1 принимаем

$$b_3 = 0,55 \text{ см.}$$

Сечение элементарного провода с размерами $a_3 = 0,244 \text{ см}$, $b_3 = 0,55 \text{ см}$ с учетом закругления углов (по табл. П1-1)

$$s_3 = 12,9 \text{ мм}^2.$$

Ширина паза (окончательно)

$$b_{II} = 2b_3 + 2\Delta_{II} + 2\delta_{II} = 2 \cdot 0,55 + 2 \cdot 0,04 + 1,08 = 2,26 \text{ см.}$$

Число проводников в стержне

$$c_3 = \frac{s}{s_3} = \frac{488}{12,9} = 37,9.$$

Принимаем

$$c_3 = 38.$$

Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$s = c_3 s_3 = 38 \cdot 12,9 = 490 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в обмотке статора

$$\Delta = \frac{I_{II}}{a \cdot s} = \frac{1440}{1 \cdot 490} = 2,94 \text{ а/мм}^2.$$

Высота элементарного проводника стержня с учетом изоляции

$$a_{II} = a_3 + \Delta_{II} = 0,244 + 0,04 = 0,284 \text{ см.}$$

Ширина элементарного проводника с учетом изоляции

$$b_{II} = b_3 + \Delta_{II} = 0,59 + 0,04 = 0,63 \text{ см.}$$

Суммарная высота изолированных элементарных проводников одного стержня

$$h_0 = a_{II} \left(\frac{c_3}{2} + 1 \right) = 0,284 \left(\frac{38}{2} + 1 \right) = 5,68 \text{ см.}$$

Высота паза или зубца статора

$$h_{II} = h_z = 2h_0 + \delta_{II} + \Delta h + h_{кл} = 2 \cdot 5,68 + 2,59 + 0,04 + 0,9 = 14,93 \text{ см,}$$

где $h_{кл}$ — высота клина (с учетом высоты усика);

$$h_{кл} = 0,3 \quad b_{II} = 0,3 \cdot 2,26 \approx 0,9 \text{ см.}$$

Принимаем

$$h_{II} = h_z = 15 \text{ см.}$$

Разрез паза статора генератора, построенный по табл. 3-5, показан на рис. 6-1.

Средний перепад температуры в изоляции паза

$$\theta_{II} = \frac{0,119 \Delta I_z \delta_{II} k_f}{1000 (h_{II} - h_{кл}) \lambda} = \frac{0,119 \cdot 533 \cdot 2,94 \cdot 5,41 \cdot 0,54 \cdot 1,2}{1000 (15 - 0,9) \cdot 0,0016} = 29 < 30^\circ \text{ C.}$$

Выбор зазора между статором и ротором, определение длины сердечника статора и высоты ярма

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора (во втором приближении в относительных единицах)

$$x_\sigma = 1,5 \frac{A}{B_6} \left(3,1 \frac{h_{II}}{\tau} + 0,53 \frac{\tau}{l_6} \right) = 1,4 \frac{533}{7740} \left(3,1 \frac{15}{42,5} + 0,53 \frac{42,5}{106} \right) = 0,127,$$

где B_6 — индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении,

$$B_6 = \frac{V_{6н}}{k_L} = \frac{8360}{1,08} = 7740 \text{ эс.}$$

Минимальный зазор между статором и ротором, обеспечивающий за- данное x_{ad} ,

$$\delta = 0,562 \left(\frac{k_0}{k_\delta} \right) \frac{\tau k_d}{x_{ad}} \frac{A}{B_6} k_{II} = 0,562 \frac{0,94}{1,10} \cdot \frac{0,62}{42,5 \cdot 0,84} \cdot \frac{533}{7740} \cdot 0,94 = 1,80 \text{ см,}$$

где

$$x_{ad} = x_\sigma = 0,75 - 0,127 \approx 0,62.$$

Минимальный зазор по производственно-монтажным сообра- жениям

$$\delta \geq 0,15 (1 + D \cdot 10^{-2}) = 1,12 \text{ см.}$$

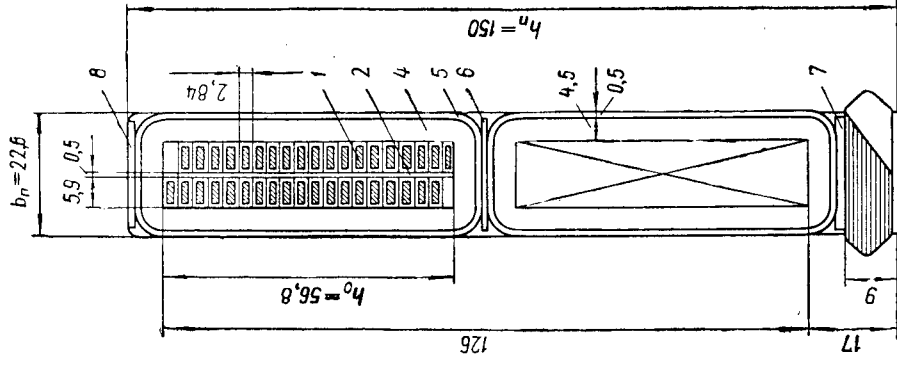


Рис. 6-1. Разрез паза статора гидрогенератора на 26200 квт, 125 об/мин, 10,5 кв (табл. 3-5):

1 — провод ПДА 2,44 × 5,9; 2 — прокладка из миканита толщиной 0,5 мм; 4 — изоляция стержня из миканита толщиной 0,13 мм (15 слоев вполюхлеста); 5 — железная асбестовая лента толщиной 0,5 мм (1 слой впритык); 6 — прокладка из миканита толщиной 2 мм; 7 — прокладка из миканита толщиной ~ 2 мм; 8 — прокладка из миканита толщиной 1 мм

Принимаем зазор $\delta = 1,8$ см.

Максимальный зазор под красн полюса

$$\delta_{\text{макс}} = 1,5\delta = 1,5 \cdot 1,8 = 2,7 \text{ см.}$$

Средний зазор

$$\delta_{\text{ср}} = 1,167\delta = 1,167 \cdot 1,8 = 2,1 \text{ см.}$$

Длина пакета сердечника статора

$$l'_1 = 4,5 \text{ см.}$$

Ширина канала в сердечнике

$$b_B = 1 \text{ см.}$$

Число каналов в сердечнике

$$n_B = \frac{l_0 - l'_1 - 2\delta_{\text{ср}}}{l'_1 + b_B - b'_B} = \frac{106 - 4,5 - 2 \cdot 2,1}{4,5 + 1 - 0,1} = 18,$$

где $b'_B = 0,1$ по табл. 3-8.

Полная длина сердечника статора

$$l_1 = l'_1 (n_B + 1) + b_B n_B = 4,5(18 + 1) + 1 \cdot 18 \approx 104 \text{ см.}$$

Расчетная длина сердечника

$$l_0 = l_1 - b'_B n_B + 2\delta_{\text{ср}} = 103,5 - 0,1 \cdot 18 + 2 \cdot 2,1 \approx 106 \text{ см.}$$

Суммарная длина пакетов сердечника

$$l_M = l'_1 (n_B + 1) = 4,5(18 + 1) = 85,5 \text{ см.}$$

Магнитный поток при номинальной нагрузке (в первом приближении)

$$\Phi_H = \frac{k_E U_H 10^8}{4k_B f_{\text{кв}} \omega} = \frac{1,08 \cdot 6060 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,09 \cdot 50 \cdot 0,94 \cdot 126} = 2,53 \cdot 10^7 \text{ макс.}$$

Высота яра сердечника статора

$$h_a = \frac{\Phi_H}{2l_M B_a k_c} = \frac{2,53 \cdot 10^7}{2 \cdot 85,2 \cdot 13500 \cdot 0,93} \approx 12 \text{ см.}$$

Наружный диаметр сердечника статора

$$D_a = D + 2h_n + 2h_a = 650 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 12 = 704 \text{ см.}$$

Большая хорда сегмента сердечника статора (см. § 3-1)

$$H_c = D_a \frac{\pi \cdot z_c}{z} = 704 \frac{\pi 7}{378} = 41 < 42 \text{ см.}$$

Выбор размеров сердечника ротора и демферной обмотки

Ширина полюсного наконечника (хорда полюса)

$$b_p = b'_p = at = 0,73 \cdot 42,5 = 31 \text{ см.}$$

Радиус внешней поверхности полюсного наконечника

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8(\delta_{\text{макс}} - \delta)}{b_p^2}} = \frac{650}{2 + \frac{8 \cdot 650(2,7 - 1,8)}{31^2}} = 194,5 \text{ см.}$$

Длина сердечника полюса

$$l_m = l_1 - 0,1 \tau = 104 - 0,1 \cdot 42,5 \approx 100 \text{ см.}$$

Эквивалентная длина нажимной щеки

$$l_{\text{щз}} = 0,1 b_p = 0,1 \cdot 31 \approx 3,1 \text{ см.}$$

Шаг демферной обмотки (предварительно)

$$t_{z2} = t_z = 5,41 \text{ см.}$$

Число стержней на полюс

$$n_c \approx 1 + \frac{b_p - d_c - 2}{t_{z2}} = 1 + \frac{31 - 1,5 - 2}{5,41} = 6,07,$$

где $d_c = 1,5$ см — диаметр стержня (предварительно). Принимаем

$$n_c = 6.$$

Сечение медного стержня демферной обмотки

$$s_c = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{0,15 \tau A}{n_c \Lambda} = \frac{0,15 \cdot 42,5 \cdot 533}{6 \cdot 2,73} = 210 \text{ мм}^2.$$

Принимаем

$$d_c = 1,6 \text{ см,}$$

$$s_c = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{\pi 1,6^2}{4} = 200 \text{ мм}^2.$$

Шаг демферной клетки

$$t_{z2} = \frac{b_p - d_c - 2}{n_c - 1} = \frac{31 - 1,6 - 2}{6 - 1} = 5,38 \text{ см.}$$

Сечение короткозамыкающего сегмента демферной обмотки

$$s_K \approx 0,5 n_c s_c = 0,5 \cdot 6 \cdot 200 = 600 \text{ мм}^2.$$

Размеры короткозамыкающего сегмента демферной обмотки

$$b_K = 1,2 \text{ см} > 0,7 d_c;$$

$$h_K = \frac{s_K}{b_K} = \frac{6,00}{1,2} = 5,0 \text{ см} > 2 d_c.$$

Размеры прорези паза демферной обмотки (предварительно)

$$b_{\text{шз}} = h_4 \approx 0,3 \text{ см.}$$

Длина стержня демферной обмотки

$$l_c = l_1 + 0,3 \tau = 104 + 0,3 \cdot 42,5 \approx 117 \text{ см.}$$

Высота полюсного наконечника

$$h_p = h_{p0} + d_c = 3,7 + 1,6 = 5,3 \text{ см},$$

где $h_{p0} = 3,7 \text{ см}$ — размер по табл. 3-9.

Высота сердечника полюса (по табл. 3-10)

$$h_m = \left(\frac{h_m}{\tau} \right) \tau = 0,59 \cdot 42,5 = 25 \text{ см}.$$

Определение ширины сердечника полюса (§ 3-4)

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия (§ 3-5)

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} k_\phi k_1 = \frac{2}{\pi} 1,04 \cdot 1,03 = 0,682,$$

где $k_1 = 1,03$; $k_\phi = 1,04$,

$$\frac{\delta}{\tau} = \frac{1,8}{42,5} = 0,042; \quad \alpha = 0,73; \quad \frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5.$$

Коэффициент воздушного зазора (§ 3-5)

$$k_\delta = k_{\delta 1} + (k_{\delta 2} - 1) = 1,08 + (1,0 - 1,0) = 1,08,$$

где

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_\pi^2}{t_z (5\delta_{cp} + b_\pi) - b_\pi^2} = 1 + \frac{2,34}{5,41(5 \cdot 2,1 + 2,34) - 2,34^2} = 1,08;$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\pi 2}^2}{t_{z2} (5\delta_{cp} + b_{\pi 2}) - b_{\pi 2}^2} \approx 1,00.$$

Высота края полюсного наконечника

$$h'_p = h_p - \frac{b_p^2}{8R} = 5,3 - \frac{31^2}{8 \cdot 94,5} \approx 4,0 \text{ см}.$$

Расчетная высота полюсного наконечника

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3} = \frac{2 \cdot 5,3 + 4,0}{3} = 4,87 \text{ см}.$$

Среднее расстояние между боковыми поверхностями полюсного наконечника

$$a_p = \frac{\pi(D - 2\delta_{\max} - h'_p)}{2\rho} - b_p = \frac{\pi(650 - 2 \cdot 2,7 - 4,0)}{48} - 31 = 11 \text{ см}.$$

Среднее расстояние между боковыми поверхностями сердечника полюса

$$a_m = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - h_m)}{2\rho} - b_p + 2h_p = \frac{\pi(650 - 2 \cdot 1,8 - 2 \cdot 5,3 - 25)}{48} - 31 + 2 \cdot 5,3 = 19,6 \text{ см}.$$

Коэффициент рассеяния полюсов (предварительно)

$$\sigma_m = 1 + 10 \frac{k_\delta \delta h_{pm}}{\alpha_\delta \tau a_p} k_\sigma = 1 + 10 \frac{1,08 \cdot 1,8 \cdot 4,87}{0,682 \cdot 42,5 \cdot 11} \cdot 1,24 = 1,37,$$

где $k_\sigma = 1,24$ определен по рис. 3-8 при следующих значениях,

$$\varphi_B = \frac{h_m a_p}{h_{pm} a_m} = \frac{25}{4,87} \cdot \frac{11}{19,6} = 2,9;$$

$$\lambda = \frac{l_1}{\tau} = \frac{104}{42,5} = 2,5.$$

Поток в основании сердечника полюса при номинальной нагрузке

$$\begin{aligned} \Phi_{mn} &= \frac{\Phi_H}{k_E} [E_{\delta d} + (\sigma_m - 1)(F_1 + E_{ad})] = \\ &= \frac{2,58 \cdot 10^7}{1,08} [1,06 + (1,37 - 1) 1,55] = 3,87 \cdot 10^7 \text{ мкс}. \end{aligned}$$

Ширина сердечника полюса

$$b_m = \frac{\Phi_{mn}}{k_{mc} l'_m B_m} = \frac{3,87 \cdot 10^7}{0,95 \cdot 106,5 \cdot 17000} \approx 22,5 \text{ см},$$

где

$$l'_m = l_m + 2l_{\text{шз}} = 100 + 2 \cdot 3,1 \approx 106,5 \text{ см}.$$

Длина обода ротора (по рис. 3-5)

$$\begin{aligned} l_{a2} &= (l_m - 2\delta_0) + b'_m + 2b_0 + \Delta = \\ &= 100 - 2 \cdot 3,37 + 23,3 + 2 \cdot 4,48 + 5 \approx 130 \text{ см}, \end{aligned}$$

где

$$\delta_0 = 0,15 b_m = 0,15 \cdot 22,5 = 3,37 \text{ см}.$$

Характеристики намагничивания и холостого хода

Поток в зазоре

$$\Phi = \frac{10^8}{4k_B f_{\text{эк0}}} E_B = \frac{10^8}{4 \cdot 1,07 \cdot 50 \cdot 126 \cdot 0,94} E_B = 3,96 \cdot 10^3 E_B = c_1 E_B, \text{ мкс},$$

где

$$k_B = \frac{1,11}{k_\phi} = \frac{1,11}{1,04} = 1,07.$$

Индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{1}{0,682 \cdot 42,5 \cdot 106,0} \Phi = 3,25 \cdot 10^{-4} \Phi = c_2 \Phi, \text{ эс}.$$

Магнитное напряжение зазора

$$F_{\delta 12} = 0,8 k_\delta B_\delta = 0,8 \cdot 1,08 \cdot 1,8 B_\delta = 1,555 B_\delta = c_6 B_\delta, \text{ а}.$$

Индукция в сечении, расположенном на $1/3$ высоты зубца от зазора,

$$B_z = \frac{l_0^2 z}{k_c l_m b z^{1/3}} B_0 = \frac{106 \cdot 5,41}{0,93 \cdot 85,5 \cdot 3,23} B_0 = 2,23 B_0 = c_3 B_0, \text{ эс,}$$

где $b z^{1/3} = t z^{1/3} - b_n = 5,49 - 2,26 = 3,23 \text{ см,}$

$$t z^{1/3} = \frac{\pi \left(D + \frac{2}{3} h_n \right)}{z} = \frac{\pi \left(650 + \frac{2}{3} \cdot 15 \right)}{378} = 5,49 \text{ см.}$$

Коэффициент

$$k_m^{1/3} = \frac{t z^{1/3} l_1}{b z^{1/3} l_m k_c} - 1 = \frac{5,49 \cdot 104}{3,23 \cdot 85,5 \cdot 0,93} - 1 = 1,23.$$

Магнитное напряжение зубцов статора, выполненных из стали Э42 толщиной 0,5 мм (табл. П2-1 или приложение П-4)

$$F_z = h_n H_z = 15 H_z, a.$$

Индукция в яре статора

$$B_a = \frac{1}{2 l_m h_a k_c} \Phi = \frac{1}{2 \cdot 84 \cdot 12 \cdot 0,93} \Phi = 5,32 \cdot 10^{-4} \Phi = c_4 \Phi, \text{ эс.}$$

Магнитное напряжение яра

$$F_a = \zeta L_a H_a = 22,7 \zeta H_a, a,$$

где

$$L_a = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4 p} = \frac{\pi (704 - 12)}{4 \cdot 24} = 22,7, \text{ см.}$$

Индукция в зубцах полюсного наконечника

$$B_{z2} = \frac{l_0^2 z_2}{k_m c l_m b z_2} B_0 = \frac{106 \cdot 5,38}{0,95 \cdot 100 \cdot 3,88} B_0 = 1,55 B_0 = c_5 B_0, \text{ эс.}$$

Магнитное напряжение зубцов полюсного наконечника, выполненного из листовой стали Ст. 3 толщиной 1,5 мм (табл. П 2-2),

$$F_{z2} = L_{z2} H_{z2} = 1,9 H_{z2}, a,$$

где

$$L_{z2} = h_4 + d_c = 0,3 + 1,6 = 1,9 \text{ см.}$$

Магнитная проводимость для потока рассеяния полюсов

$$\lambda_{вс} = \lambda_p + \lambda_{mv} + \lambda_{mn} = 0,644 + 0,787 + 0,078 = 1,509,$$

212

где

$$\begin{aligned} \lambda_p &= 1,4 \left(\frac{d_t}{a_p} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{c_p}{a_p} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{c_p}{a_p} - 0,5 \right)^2 = \\ &= 1,4 \left(\frac{6,73}{10,62} - 0,25 \right) + 0,55 \left(\frac{4,25}{10,62} + 0,2 \right) - 0,4 \left(\frac{4,25}{10,62} - 0,5 \right)^2 = \\ &= 0,644; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{mv} &= \frac{0,55 h_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p} (h_m + 2h_p + 2\delta)} = \\ &= \frac{0,55 \cdot 25}{42,5 - 22,5 - \frac{\pi}{48} (25 + 2 \cdot 5,3 + 2 \cdot 1,8)} = 0,787; \end{aligned}$$

$$\lambda_{mn} = 0,37 \frac{b_m}{l_m} = 0,37 \frac{22,5}{106,5} = 0,078;$$

$$c_p = \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{31 - 22,5}{2} = 4,25;$$

$$a_p' = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p} = 42,5 - 31 - \frac{\pi 6,73}{24} = 10,62;$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D} = 5,3 + 1,8 - \frac{31^2}{4 \cdot 650} = 6,73.$$

Поток рассеяния полюсов

$$\Phi_\sigma = 4 \lambda_{вс} l_m F_1 = 4 \cdot 1,509 \cdot 106,5 F_1 = 642 F_1 = c_7 F_1,$$

где

$$F_1 = F_{\delta 12} + F_z + F_a + F_{z2}.$$

Индукция в сечении полюса у его основания

$$B_m = \frac{\Phi_m}{k_m c l_m b_m} = \frac{1}{0,95 \cdot 106,5 \cdot 22,5} \Phi_m = 4,39 \cdot 10^{-4} \Phi_m = c_8 \Phi_m, \text{ эс,}$$

где $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$.

Магнитное напряжение сердечника полюса

$$F_m = L_m H_m = 27,7 H_m, a,$$

где

$$L_m = h_m + 0,5 h_p = 25 + 0,5 \cdot 5,3 = 27,7 \text{ см.}$$

Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора $F_{\delta m}$ (по табл. 3-11).

Расчет характеристики намагничивания и характеристики холостого хода сведен в табл. 6-1, помещенную на стр. 252.

Характеристика холостого хода изображена на рис. 6-2, частичные характеристики намагничивания — на рис. 6-3.

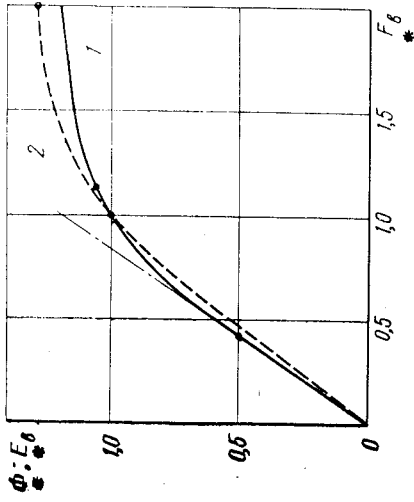


Рис. 6-2. Характеристики холостого хода:

1 — гидрогенератора на 26200 квв, 125 об/мин, 10,5 кв; 2 — нормальная характеристика холостого хода

Магнитные напряжения зазоров при номинальном напряжении и холостом ходе (табл. 6-1)

$$F_{\delta 12} = 12100 \text{ а};$$

$$F_{\delta} = F_{\delta m} + F_{\delta 12} = 515 + 12100 = 12615 \text{ а}.$$

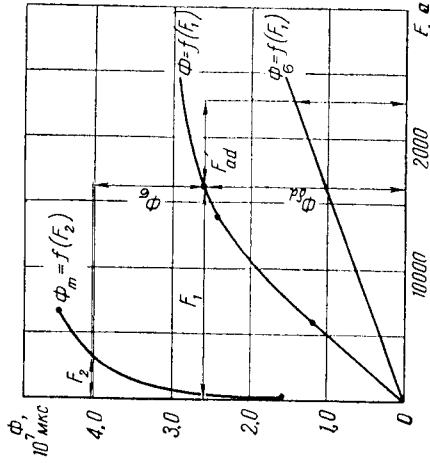


Рис. 6-3. Определение намагничивающей силы обмотки возбуждения гидрогенератора на 26200 квв, 125 об/мин, 10,5 кв при помощи частичных характеристик

Средняя длина полувитка l_{cp} и вылет лобовой части f_l обмотки статора (приложение 3)

Расстояние между осями лобовых частей

$$f = b_{\pi} + m = 2,26 + 0,9 = 3,16 \text{ см}.$$

Синус угла отгиба лобовой части

$$\sin \alpha = \frac{f}{t_z} = \frac{3,16}{5,41} = 0,584.$$

Средняя ширина лобовой части

$$\tau_y = \frac{\pi(D + h_{\pi})}{z} y_{kcp} = \frac{\pi(650 + 15)7,86}{378} = 43,4 \text{ см}.$$

Расчетная ширина лобовой части для стороны укороченных шагов

$$\tau_{y1} = \frac{\pi \left(D + \frac{h_{\pi}}{2} \right)}{z} y_k = \frac{\pi \left(650 + \frac{15}{2} \right)}{378} = 38,3 \text{ см},$$

для стороны удлиненных шагов

$$\tau_{y2} = \frac{\pi \left(D + \frac{h_{\pi}}{2} \right)}{z} (2\tau - y_k) = \frac{\pi \left(650 + \frac{15}{2} \right)}{378} (2 \cdot 7,86 - 7) = 48,1 \text{ см}.$$

Высота стержня без корпусной изоляции

$$H = \frac{h_1}{2} - \delta_{\pi} = \frac{12,6}{2} - 0,54 \approx 5,76 \text{ см}.$$

Ширина стержня без корпусной изоляции

$$B = b_{\pi} - 2\delta_{\pi} = 2,26 - 1,08 = 1,18 \text{ см}.$$

Средняя длина полувитка обмотки статора (см. табл. ПЗ-2 и ПЗ-1)

$$l_{cp} = l_1 + 2A + k_{\sigma}c + k_{\sigma}r_3 + \pi \left(r_1 + \frac{H}{2} \right) =$$

$$= 104 + 2 \cdot 7 + 1,24 \cdot 38,8 + 0,87 \cdot 6,18 + \pi \left(1,75 + \frac{5,76}{2} \right) \approx 187 \text{ см},$$

где

$$c = \tau_y - r_1 - \frac{H}{2} = 43,4 - 1,75 - \frac{5,76}{2} = 38,8 \text{ см},$$

$$r_3 = r_2 + \frac{B}{2} = 5 + \frac{1,18}{2} = 5,53 \text{ см}.$$

Вылеты лобовых частей со стороны укороченных шагов

$$f_1 = A + N_1 + H = 7 + 17,1 + 5,76 \approx 30,0 \text{ см},$$

где

$$N_1 = k_1 [0,5\tau_{y1} \sin \alpha + (1 - \sin \alpha) r_3] =$$

$$= 1,24 [0,5 \cdot 38,3 \cdot 0,584 + (1 - 0,584) 5,53] = 16,8 \text{ см};$$

со стороны удлиненных шагов

$$f_2 = A + N_2 + H = 7 + 20,8 + 5,76 \approx 34 \text{ см},$$

где

$$N_2 = k_1 [0,5\tau_{y2} \sin \alpha + (1 - \sin \alpha) r_3] =$$

$$= 1,24 [0,5 \cdot 48,1 \cdot 0,584 + (1 - 0,584) 5,53] = 20,5 \text{ см}.$$

Сопротивления обмотки статора (§ 3-8)

Активное сопротивление обмотки статора при $t = 75^\circ \text{C}$

$$r_a = k_r 0,75 \frac{2l_{cp} \rho_w}{as} = 1,07 \cdot 0,0216 \frac{2 \cdot 1,87 \cdot 126}{1 \cdot 490} = 0,0222 \text{ ом,}$$

где

$$k_r = 1 + \frac{l_\delta}{l_{cp}} (k_{rn} - 1) = 1 + \frac{106}{187} (1,125 - 1) = 1,07;$$

$$k_{rn} = \varphi(\xi) + \frac{m_2^2 - 1}{3} \psi(\xi) = 1,00 + \frac{38^2 - 1}{3} 0,33 \cdot 1,68^4 \cdot 10^{-4} = 1,125;$$

$$\xi = 0,95 a_0 \sqrt{\frac{b_1}{b_\Pi}} = 0,95 \cdot 0,244 \sqrt{\frac{1,19}{2,26}} = 0,168;$$

$$\varphi(\xi) = 1 + 0,09 \xi^4 = 1,00;$$

$$\psi(\xi) = 0,33 \xi^4 = 0,33 \cdot 1,68^4 \cdot 10^{-4}.$$

В относительных единицах

$$r_a^* = r_a \frac{I_\Pi}{U_{нФ}} = 0,0222 \frac{1440}{6060} = 0,0053.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора (в относительных единицах)

$$x_\sigma = 5,6 \frac{\Sigma \lambda}{k_0 q m} \frac{A}{B_\delta} = 5,6 \frac{3,02}{0,94 \cdot 2,62 \cdot 3} \cdot \frac{533}{7800} = 0,157,$$

$$\text{где } \Sigma \lambda = \lambda_\Pi + \lambda_\Gamma + \lambda_\Pi = 2,4 + 0,145 + 0,476 = 3,02,$$

$$\lambda_\Pi = \frac{3\beta + 1}{4} \left[\frac{h_1}{3b_\Pi} + \frac{h_2 + h_4}{b_\Pi} \right] = \frac{3 \cdot 0,89 + 1}{4} \left[\frac{12,6}{3 \cdot 2,26} + \frac{1,7}{2,26} \right] = 2,4;$$

$$\lambda_\Gamma = 0,03 \frac{\tau_{\alpha\delta}}{\delta_{cp} k_{\delta q}} = 0,03 \frac{42,5 \cdot 0,682}{2,1 \cdot 1,08 \cdot 2,62} = 0,145;$$

$$\lambda_\Pi = 0,34 \frac{q}{l_\delta} (l_\Gamma - 0,64 \tau_\beta) k_y^2 =$$

$$= 0,34 \frac{2,62}{106} (83 - 0,64 \cdot 42,5 \cdot 0,89) 0,984^2 = 0,476;$$

$$l_\Gamma = l_{cp} - l_1 = 187 - 104 = 83 \text{ см.}$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки статора по продольной оси

$$x_{ad} = 0,0159 m \frac{f}{100} \left(\frac{w k_0}{100} \right)^2 \frac{l_\delta \tau}{p \delta_\delta} = 0,0159 \cdot 3 \frac{50}{100} \left(\frac{126 \cdot 0,94}{100} \right)^2 \frac{106 \cdot 42,5}{24 \cdot 2,35} = 2,67 \text{ ом,}$$

где

$$\delta_\delta' = \frac{k_\delta \delta F'_\delta}{k_1 k_d F_{\delta 12}} = \frac{1,08 \cdot 1,8 \cdot 12 \cdot 615}{1,03 \cdot 0,84 \cdot 12 \cdot 100} = 2,35 \text{ см.}$$

В относительных единицах

$$x_{ad}^* = x_{ad} \frac{I_\Pi}{U_{нФ}} = 2,67 \frac{1440}{6060} = 0,635.$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции статора по поперечной оси (в относительных единицах)

$$x_{aq}^* = x_{ad}^* \frac{\delta_\sigma'}{\delta_q'} = 0,635 \frac{2,35}{3,43} = 0,435,$$

где

$$\delta_q' = \frac{k_\delta \delta}{k_1 k_q} = \frac{1,08 \cdot 1,8}{1,03 \cdot 0,55} = 3,43 \text{ см.}$$

Индуктивное сопротивление статора по продольной оси отличается от заданного не более чем на 5%

$$x_d^* = x_\sigma^* + x_{ad}^* = 0,157 + 0,635 = 0,792.$$

Индуктивное сопротивление статора по поперечной оси (в относительных единицах)

$$x_q^* = x_\sigma^* + x_{aq}^* = 0,157 + 0,435 = 0,592.$$

Намагничивающая сила обмотки возбуждения при номинальной нагрузке (§ 3-6)

Намагничивающая сила обмотки якоря (первая гармоническая) при номинальной нагрузке

$$F_a = 1,35 \frac{w k_0}{p} I_\Pi = 1,35 \frac{126 \cdot 0,94}{24} 1440 = 9600 \text{ а.}$$

Векторная диаграмма генератора при номинальной нагрузке показана на рис. 6-4.

Поток продольного поля

$$\Phi_{\delta d} = c_1 E_{\delta d} = c_1 U_\Pi E_{\delta d} = 3,96 \cdot 10^3 \cdot 6060 \cdot 1,08 = 2,59 \cdot 10^7 \text{ макс,}$$

где $E_{\delta d}^* = 1,08$ по векторной диаграмме (рис. 6-4).

Магнитное напряжение зазора, зубцов и ярма статора для потока $\Phi_{\delta d}$ по частичной характеристике намагничивания $\Phi = f(F_1)$ (рис. 6-3)

$$F_1 = 16200 \text{ а.}$$

Намагничивающая сила обмотки возбуждения, эквивалентная продольной н. с. статора,

$$F_{ad} = F_a k_d \sin \psi = F_a k_d \frac{I_d^*}{I_H^*} = 9600 \cdot 0,84 \cdot 0,83 = 6680 \text{ а,}$$

где $I_d^* = 0,83$ (рис. 6-4).

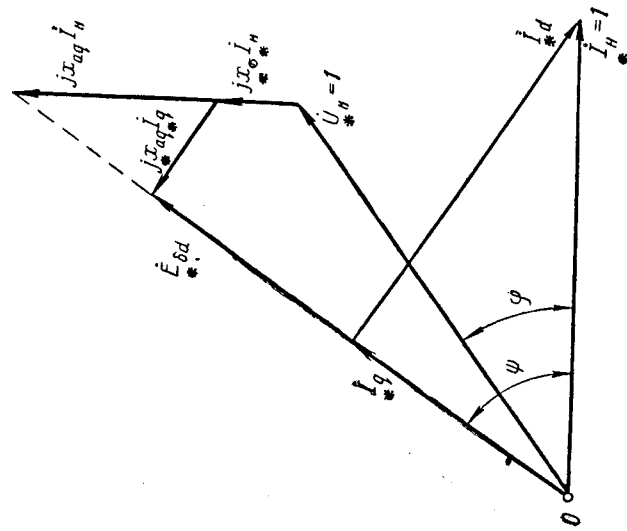


Рис. 6-4. Векторная диаграмма гидрогенератора на 26200 кв.а, 125 об/мин, 10,5 кв при номинальной нагрузке (в относительных единицах)

Поток рассеяния полюсов при нагрузке

$$\Phi_{\sigma} = 4\lambda_{\text{вс}} I_m' (F_1 + F_{ad}) = 642 \cdot 22880 = 1,47 \cdot 10^7 \text{ мкс,}$$

где $F_1 + F_{ad} = 16200 + 6680 = 22880 \text{ а.}$

Поток в основании сердечника полюса отличается от предварительно определенного потока на 5%

$$\Phi_m = \Phi_{\delta d} + \Phi_{\sigma} = (2,59 + 1,47) 10^7 = 4,06 \cdot 10^7 \text{ мкс.}$$

Магнитное напряжение сердечника полюса и подполюсного зазора (рис. 6-3)

$$F_2 = 2400 \text{ а.}$$

Намагничивающая сила обмотки возбуждения при номинальной нагрузке

$$F_{\text{вн}} = F_1 + F_{ad} + F_2 = 16200 + 6680 + 2400 = 24280 \text{ а.}$$

В относительных единицах

$$F_{\text{вн}}^* = \frac{F_{\text{вн}}}{F_{\text{вх}}} = \frac{24280}{14847} = 1,63.$$

Индукция в участках магнитной цепи при номинальной нагрузке

$$B_{\delta} = c_2 \Phi_{\delta d} = 3,25 \cdot 10^{-4} \cdot 2,59 \cdot 10^7 = 8420 \text{ эс,}$$

$$B_z = c_3 B_{\delta} = 2,23 \cdot 8420 = 18750 \text{ эс,}$$

$$B_a = c_4 \Phi_{\delta d} = 5,32 \cdot 10^{-4} \cdot 2,59 \cdot 10^7 = 13800 \text{ эс,}$$

$$B_m = c_8 \Phi_m = 4,39 \cdot 10^{-4} \cdot 4,06 \cdot 10^7 = 17800 \text{ эс.}$$

Выбор размеров, тока и основных параметров обмотки возбуждения (§ 3-7)

Сечение провода обмотки возбуждения

$$s_{\text{в}} = (0,15 - 0,23) \tau^2 = (0,15 - 0,23) 42,5^2 = 270 - 415 \text{ мм}^2.$$

Сечение провода обмотки возбуждения (во втором приближении)

$$s_{\text{в}} = 1,15 \frac{0,1 U_{\text{вн}} F_{\text{вн}}}{25 U_{\text{вн}}} = 1,15 \frac{0,0256 \cdot 137 \cdot 24 \cdot 24280}{25 \cdot 230} = 418 \text{ мм}^2,$$

где $l_{\text{в}}$ — средняя длина полувитка обмотки возбуждения,

$$l_{\text{в}} = (l_m - 0,3b_m) + \frac{\pi}{2} (b_m + 2\delta_m + 0,1\tau) =$$

$$= (100 - 0,3 \cdot 22,5) + \frac{\pi}{2} (22,5 + 0,6 + 0,1 \cdot 42,5) \approx 137 \text{ см;}$$

$U_{\text{вн}} = 230$ в выбрано так, чтобы сечение было порядка 270—415 мм².

Плотность тока в обмотке возбуждения

$$\Delta_{\text{в}} = \frac{0,3(1,6 + \sqrt{\tau}) k_m h_m'}{0,3(2,8 + \lambda) F_{\text{вн}}} = \frac{75(1,6 + \sqrt{42,5}) 0,91 \cdot 205}{0,3(2,8 + 2,5) 24280} = 2,94 \text{ а/мм}^2,$$

где

$$h_m' = h_m - \delta_h = 250 - 45 = 205 \text{ мм,}$$

$$\delta_h = 2\delta_{\text{ш}} + 0,04 h_m + 5 = 2 \cdot 15 + 10 + 5 = 45 \text{ мм,}$$

$$\delta_{ш} \approx 0,06h_m = 0,06 \cdot 250 \approx 15 \text{ мм,}$$

$$k_m = 0,91 \text{ по табл. 3-16,}$$

$$\lambda = l_0/\tau = 106/42,5 = 2,5.$$

Число витков обмотки возбуждения

$$\omega_b = \frac{F_{вн}}{s_b \Delta_b} = \frac{24280}{418 \cdot 2,91} = 20.$$

При выборе целого числа $\omega_b = 20$ плотность тока окончательно принята равной $2,91 \text{ а/мм}^2$.

Ширина провода обмотки возбуждения (средняя)

$$b_0 = \frac{F_{вн}}{k_m h_m \Delta_b} = \frac{24280}{0,91 \cdot 205 \cdot 2,91} = 44,8 \text{ мм.}$$

Высота провода обмотки возбуждения

$$a_0 = \frac{s_b}{b_0} = \frac{418}{44,8} = 9,35 \text{ мм.}$$

Наименьшее расстояние между катушками соседних полюсов

$$x = \frac{\pi D_{a2}}{2p} - b'_m - 2b_0 = \frac{\pi \cdot 586}{48} - 23,3 - 2 \cdot 4,48 = 6,0 \text{ см,}$$

где

$$D_{a2} = D - 2\delta - 2h_p - 2h_m = 650 - 2 \cdot 1,8 - 2 \cdot 5,3 - 2 \cdot 25 = 586 \text{ см,}$$

$$b'_m = b_m + 2\delta_n = 22,5 + 0,8 = 23,3 \text{ см (табл. 3-15).}$$

Это расстояние удовлетворяет условию

$$x = 6,0 \geq \frac{0,01l_1\tau}{h_m} + 1,3 = \frac{0,01 \cdot 104 \cdot 42,5}{25} + 1,3 = 3 \text{ см.}$$

Отношение

$$\frac{b_0}{a_0} = \frac{44,8}{9,35} = 4,8 < 10 \text{ также лежит в рекомендуемых пределах.}$$

Так как размеры провода такого сечения не стандартизованы, их можно считать окончательными. Профиль меди выберем по рис. 3-14, б.

Обмотка возбуждения, изоляционные и нажимные шайбы, а также ее изоляция от полюса изображены на масштабном эскизе полюса (рис. 6-5). На эскизе можно показать полюс от оси полюса до оси между полюсами в масштабе 1 : 1 (в очень крупных машинах 1 : 2). Дугу очертания внешней поверхности полюсного наконечника рекомендуется провести по точкам при помощи лекала. При определении координат точек можно воспользоваться уравнением

$$h_y = \frac{y^2}{8R}.$$

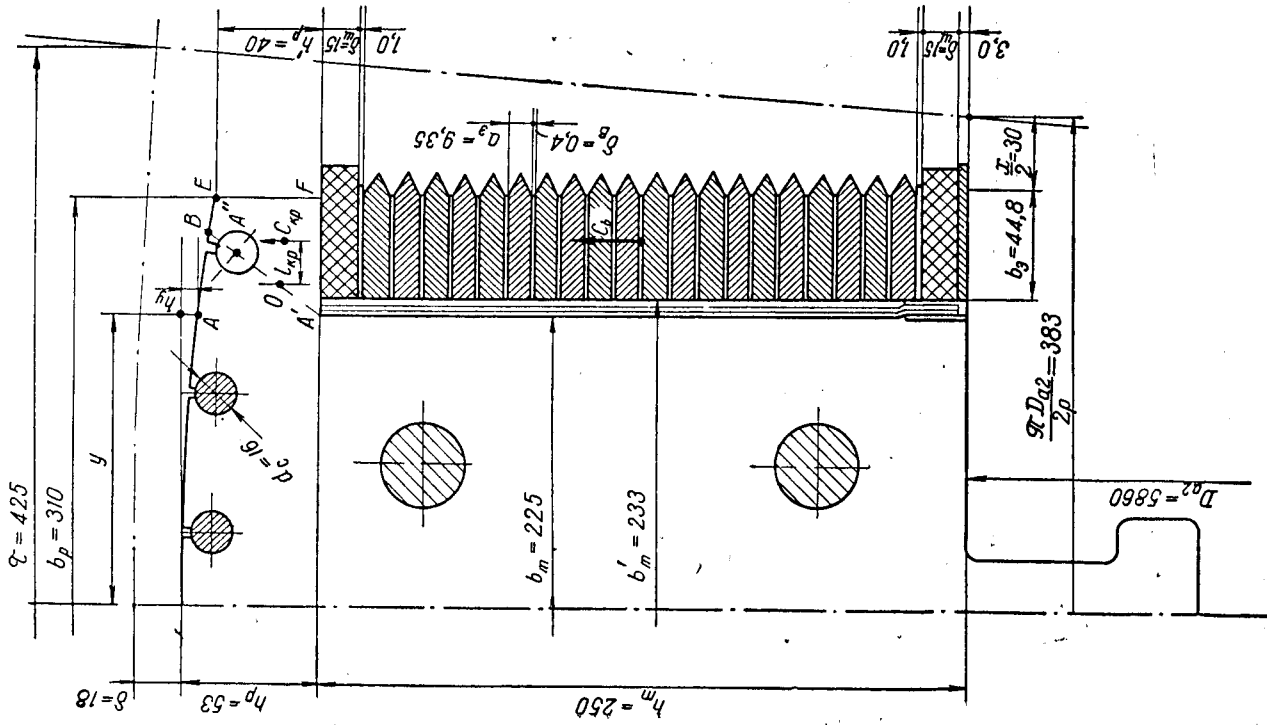


Рис. 6-5. Разрез полюса ротора гидрогенератора на 26'200 кВа, 125 об/мин, 10,5 кВ

где R — определенный выше радиус очертания полюсного башмака,

y — расстояние от оси полюса до точки, лежащей на дуге. Определенное положение точки A показано на рис. 6-5. Таким же образом можно построить часть внутренней поверхности сердечника статора, показанную на рис. 6-5. Взаимное расположение осей соседних полюсов определяется полюсными делениями $\frac{\pi D_{a2}}{2p}$ на диаметре D_{a2} и τ на диаметре D .

Омическое сопротивление обмотки возбуждения при температуре 130°C

$$r_{в130} = 0,0256 \frac{p\omega_b I_B}{25S_B} = 0,0256 \frac{24 \cdot 20 \cdot 137}{25 \cdot 418} = 0,161 \text{ ом.}$$

Омическое сопротивление при $t = 15^\circ\text{C}$

$$r_{в15} = \frac{r_{в130}}{1,46} = 0,11 \text{ ом.}$$

Номинальный ток возбуждения

$$I_{вн} = \frac{F_{вн}}{\omega_B} = \frac{24 \cdot 280}{20} = 1210 \text{ а.}$$

Ток возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении

$$I_{вх} = \frac{F_{вх}}{\omega_B} = \frac{14 \cdot 850}{20} = 742 \text{ а.}$$

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и $t = 130^\circ\text{C}$

$$U'_{вн} = r_{в130} I_{вн} = 0,161 \cdot 1210 = 195 \text{ в.}$$

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при холостом ходе и холодном гидрогенераторе ($t = 15^\circ\text{C}$)

$$U'_{вх} = r_{в15} I_{вх} = 0,11 \cdot 742 = 81,5 \text{ в.}$$

Коэффициент запаса возбуждения

$$k = \frac{U_{вн}}{r_{в130} I_{вн}} = \frac{230}{195} = 1,18.$$

Предельное напряжение возбуждения

$$U_{в\text{ макс}} = k_{пр} U_{вн} = 1,8 \cdot 230 = 415 \text{ в,}$$

где

$$k_{пр} = 1,8 \text{ по ГОСТ 5616—50.}$$

Параметры, постоянные времени гидрогенератора

Омическое сопротивление обмотки возбуждения при температуре 75°C

$$r_{в} = \frac{Q_{130}}{Q_{75}} r_{в130} = 0,85 \cdot 0,161 = 0,137 \text{ ом.}$$

В относительных единицах

$$r_{в}^* = r_{вн}^* \left[\frac{\omega_b k_0 k_d}{2p\omega_B} \right]^2 \frac{8 I_{нф}}{\pi^2 U_{нф}} = 0,137 \cdot 3 \left[\frac{126 \cdot 0,94 \cdot 0,84}{48 \cdot 20} \right]^2 \frac{8 \cdot 1440}{\pi^2 \cdot 6060} = 0,000850.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{в\sigma}^* = x_{ад}^* \left[1,27 k_d \left(k_{\Phi} + \frac{4F_{\delta} l_{\lambda_{в\sigma}}}{\Phi} \right) - 1 \right] = 0,635 \left[1,27 \cdot 0,84 \left(1,04 + \frac{4 \cdot 12615 \cdot 104 \cdot 1,2}{2 \cdot 4 \cdot 10^7} \right) - 1 \right] = 0,248,$$

где

$$\lambda'_{в\sigma} = \lambda_p + \frac{\lambda_{рмв}}{1,53} + \frac{\lambda_{мн}}{2,65} = 0,644 + \frac{0,787}{1,53} + \frac{0,078}{2,65} = 1,2.$$

Индуктивное сопротивление демферной обмотки в относительных единицах

$$x_{y\sigma d}^* = 4,0 \frac{F_a}{\Phi} \left[\frac{D}{4p} + \frac{2,8\lambda_{с} l_m}{n_c} \right] = 4,0 \frac{9600}{2,4 \cdot 10^7} \left[\frac{650}{4 \cdot 24} + \frac{2,8 \cdot 1,62 \cdot 100}{6} \right] = 0,131,$$

где

$$\lambda_{с} = 0,62 + \frac{h_k}{b_{ш2}} = 0,62 + \frac{0,3}{0,3} = 1,62.$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки старора в относительных единицах

$$x_d'' = x_{\sigma} + \left[\frac{1}{x_{ад}} + \frac{1}{x_{в\sigma}} + \frac{1}{x_{y\sigma d}} \right]^{-1} = 0,157 + \left[\frac{1}{0,635} + \frac{1}{0,248} + \frac{1}{0,131} \right]^{-1} = 0,23$$

близко к заданному значению.

Индуктивное сопротивление демферной обмотки на поперечной оси

$$x_{y\sigma q}^* \approx 0,75 x_{y\sigma d}^* = 0,75 \cdot 0,131 = 0,099.$$

Омические сопротивления демферной обмотки в относительных единицах при $t = 75^\circ\text{C}$: по продольной оси

$$r_{yd}^* = 27 \cdot 850 \frac{F_a}{\Phi} \left[\frac{c_c l_c}{n_c s_c} + \frac{0,2 D c_k}{p s_k} \right] = 27 \cdot 850 \frac{9600}{50 \cdot 2,4 \cdot 10^7} \left[\frac{1 \cdot 117}{6 \cdot 200} + \frac{0,2 \cdot 650 \cdot 1}{24 \cdot 600} \right] = 0,0236;$$

по поперечной оси

$$\begin{aligned} r_{yq}^* &= 20850 \frac{F_a}{f\Phi} \left[\frac{c_c l_c}{n_c s_c} + \frac{0,4 D c_k}{p s_k} \right] = \\ &= 20850 \frac{9600}{50 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^7} \left[\frac{1 \cdot 117}{6 \cdot 200} + \frac{0,4 \cdot 650 \cdot 1}{24 \cdot 600} \right] = 0,0192. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление для токов нулевой последовательности

$$x_0^* = M + N c_y = 0,15 + 0,0463 \cdot 0,353 = 0,166,$$

где

$$\begin{aligned} M &= \frac{6,52 l_0 F_a}{k^2 3 q \Phi} \left[(\beta - 0,555) \frac{h_{\pi}}{b_{\pi}} + (3\beta - 2) \frac{h_2}{b_{\pi}} \right] = \\ &= \frac{6,52 \cdot 106 \cdot 9600}{0,984^2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 10^7} \left[(0,89 - 0,555) \frac{15}{2,26} + \right. \\ &\quad \left. + (3 \cdot 0,89 - 2) \frac{1,7}{2,26} \right] = 0,15; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{F_a (3\beta - 2)}{F \delta k^2 y} \left[\left(\frac{1}{3q} \right)^2 + 0,39 \left(\beta - \frac{2}{3} \right) - \left(\beta - \frac{2}{3} \right)^2 + 0,037 \right] = \\ &= \frac{9600 (3 \cdot 0,89 - 2)}{12 \cdot 615 \cdot 0,984^2} \left[\left(\frac{1}{3 \cdot 2,7} \right)^2 + 0,39 \left(0,89 - \frac{2}{3} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \left(0,89 - \frac{2}{3} \right)^2 + 0,037 \right] = 0,0463. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых других обмотках

$$x_B = x_{B\sigma} + x_{ad} = 0,248 + 0,635 = 0,883,$$

$$T_B = \frac{x_B}{\omega r_B} = \frac{0,883}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,00085} = 3,31 \text{ сек.}$$

Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по продольной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{yd} = x_{y\sigma d} + x_{ad} = 0,131 + 0,635 = 0,766,$$

$$T_{yd} = \frac{x_{yd}}{\omega r_{yd}} = \frac{0,766}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,0236} = 0,103 \text{ сек.}$$

Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по поперечной оси при разомкнутых других обмотках

$$x_{yq} = x_{y\sigma q} + x_{aq} = 0,099 + 0,435 = 0,534,$$

$$T_{yq} = \frac{x_{yq}}{\omega r_{yq}} = \frac{0,534}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,0192} = 0,089 \text{ сек.}$$

Индуктивное сопротивление и постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутой

демперной обмотке

$$x_B' = x_{B\sigma} + \left[\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right]^{-1} = 0,248 + \left[\frac{1}{0,635} + \frac{1}{0,157} \right]^{-1} = 0,374,$$

$$T_B' = \frac{x_B'}{\omega r_B} = \frac{0,374}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,00085} = 1,4 \text{ сек.}$$

Индуктивное сопротивление и постоянная времени демпферной обмотки по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутой обмотке возбуждения

$$x_{yd}' = x_{y\sigma d} + \left[\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right]^{-1} = 0,131 + \left[\frac{1}{0,635} + \frac{1}{0,157} \right]^{-1} = 0,257,$$

$$T_{yd}' = \frac{x_{yd}'}{\omega r_{yd}'} = \frac{0,257}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,0236} = 0,0344 \text{ сек.}$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции между контурами ротора по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря

$$x_{ad}' = \left[\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma}} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{0,635} + \frac{1}{0,157} \right]^{-1} = 0,126.$$

Постоянная времени затухания продольных сверхпереходных составляющих токов (при $T_B' \gg T_{yd}'$)

$$T_d'' = \sigma'_{буд} T_{yd}' = 0,835 \cdot 0,0344 = 0,0287 \text{ сек.}$$

где

$$\sigma'_{буд} = 1 - \frac{(x'_{буд})^2}{x_B' x_{yd}'} = 1 - \frac{0,126^2}{0,374 \cdot 0,257} = 0,835.$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси

$$x_q'' = x_{\sigma} + \left[\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{y\sigma q}} \right]^{-1} = 0,157 + \left[\frac{1}{0,435} + \frac{1}{0,099} \right]^{-1} \approx 0,238 \approx x_q'.$$

Постоянная времени затухания переходных составляющих продольных токов (при $T_B' \gg T_{yd}'$)

$$T_d' \approx T_B' = 1,4 \text{ сек.}$$

Переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси (при $T_B' \gg T_{yd}'$ и $T_B' \gg T_{yd}'$)

$$x_d' = x_{\sigma} + \left[\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{B\sigma}} \right]^{-1} = 0,157 + \left[\frac{1}{0,635} + \frac{1}{0,248} \right]^{-1} = 0,308$$

(практически совпадает с заданным значением).

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока якоря

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r_a} = \frac{0,234}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,00495} = 0,15 \text{ сек.}$$

где

$$r_a = \frac{r_a}{k_r} = \frac{0,0053}{1,07} = 0,00495.$$

($k_r = 1$)

Индуктивное сопротивление для токов обратной последовательности (при $x_d'' \approx x_d'$)

$$x_2 = \frac{x_d' + x_q''}{2} = \frac{0,23 + 0,238}{2} = 0,234.$$

Механическая постоянная времени вращающихся частей генератора

$$T_I = \frac{\pi^2 G D^2}{S_H} \left(\frac{n_H}{60} \right)^2 = \frac{\pi^2 3820}{26200} \left(\frac{125}{60} \right)^2 = 6,3 \text{ сек.}$$

где

$$G D^2 \approx \beta D^{3,5} I_\delta = 5,2 \cdot 6,5^{3,5} \cdot 1,06 = 3820 \text{ т м}^2.$$

Веса активных материалов, вес ротора, нагрузка на подпятник (§ 3-9)

Вес зубцов сердечника статора

$$G_z = 7,8 I_M k_c h_H b_{z1/2} z 10^{-3} = 7,8 \cdot 85,5 \cdot 0,93 \cdot 15 \cdot 3,27 \cdot 378 \cdot 10^{-3} = 11500 \text{ кг},$$

где

$$b_{z1/2} = \frac{\pi(D + h_H)}{z} - b_H = \frac{\pi(650 + 15)}{378} - 2,26 = 3,27 \text{ см.}$$

Вес ярма сердечника статора

$$G_a = 7,8 I_M k_c \pi (D_a - h_a) h_a 10^{-3} =$$

$$= 7,8 \cdot 85,5 \cdot 0,93 \pi (704 - 12) 12 \cdot 10^{-3} = 16200 \text{ кг}.$$

Вес медной обмотки статора

$$G_{M1} = 8,9 s_c u_H I_{ср} z 10^{-5} = 8,9 \cdot 490 \cdot 2 \cdot 187 \cdot 378 \cdot 10^{-5} = 6170 \text{ кг}.$$

Вес медной обмотки возбуждения

$$G_{MВ} = 8,9 s_B (4 p I_{B \text{ в} B}) 10^{-5} = 8,9 \cdot 418 (4 \cdot 24 \cdot 137 \cdot 20) 10^{-5} = 9770 \text{ кг}.$$

Вес медных стержней демферной обмотки

$$G_c = 8,9 s_c (2 p i_c) 10^{-5} = 8,9 \cdot 200 (2 \cdot 24 \cdot 6 \cdot 117) 10^{-5} = 600 \text{ кг}.$$

Вес медных короткозамыкающих колец

$$G_K = 8,9 s_K (D - 2\delta - h_K) 2\pi \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 600 (650 - 2 \cdot 1,8 - 5) 2\pi \cdot 10^{-5} = 215 \text{ кг}.$$

Вес сердечника полюсов

$$G_m = 7,8 I_M k_{mc} [h_m b_m + 0,8 h_p b_p] 2 p 10^{-3} = 7,8 \cdot 106,5 \cdot 0,95 (25 \cdot 22,5 + 0,8 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 31) 48 \cdot 10^{-3} = 26300 \text{ кг}.$$

Вес обода ротора

$$G_0 = 7,8 I_{a2} \frac{\pi}{4} [D_{a2}^2 - (D_{a2}')^2] 0,9 \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 130 \frac{\pi}{4} [586^2 - 506^2] 0,9 \cdot 10^{-3} = 63000 \text{ кг},$$

где предварительно

$$D_{a2}' = D_{a2} - 2h_{a2} = D_{a2} - 2\tau = 586 - 2 \cdot 42,5 = 501 \text{ см.}$$

Вес ротора (с валом и остовом)

$$G_p = 1,35 (G_0 + G_m + G_{MВ} + G_c + G_K) 10^{-3} = 1,35 (63000 + 26300 + 9770 + 600 + 215) 10^{-3} \approx 138 \text{ т}.$$

Нагрузка на подпятник

$$G_{\Pi} = k_p G_p = 3,5 \cdot 138 = 487 \text{ т}.$$

Потери и коэффициент полезного действия

Потери в стали при холостом ходе (сталь Э42 т. 0,5)

Основные магнитные потери в зубьях и ярме статора

$$P_M = (k_{дa} p_a G_a + k_{дz} p_z G_z) 10^{-3} = (1,3 \cdot 2,45 \cdot 16200 + 1,7 \cdot 4,55 \times 11500) 10^{-3} = 140,7 \text{ кет},$$

где

$$p_a = p_{10/50} \left(\frac{B_{a0}}{10000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 1,5 \left(\frac{12800}{10000} \right)^2 = 2,45 \text{ вт/кг},$$

$$p_z = p_{10/50} \left(\frac{B_{z0}}{10000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 1,5 \left(\frac{17400}{10000} \right)^2 = 4,55 \text{ вт/кг}.$$

Добавочные потери на поверхности полюсных наконечников при холостом ходе

$$P_{p0} = 2 p a \tau l k_{\tau} \left(\frac{z n}{10000} \right)^{1,5} \left(\frac{B_{0z}'}{1000} \right)^2 10^{-7} = 2 \cdot 24 \cdot 0,73 \cdot 42,5 \cdot 104 \cdot 7,0 \left(\frac{378 \cdot 12,5}{10000} \right)^{1,5} \times \left(\frac{625 \cdot 5,41}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-7} = 12,7 \text{ кет},$$

где

$$B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1) = 7800 (1,08 - 1) = 625 \text{ эс},$$

$$\alpha = \frac{b_p}{\tau} = \frac{31}{42,5} = 0,73.$$

Потери в стали при холостом ходе

$$P_{\text{м0}} = P_{\text{м}} + P_{\text{р0}} = 140,7 + 12,7 = 153,4 \text{ кет.}$$

Потери короткого замыкания (при $f = 50 \text{ гц}$)

Основные электрические потери в обмотке статора при номинальном токе и 75°C

$$P_{\text{в75}} = 3 \frac{I_a^2}{k_r} 10^{-3} = 3 \frac{0,0222}{1,07} \cdot 1440^2 \cdot 10^{-3} = 129 \text{ кет.}$$

Добавочные потери в обмотке статора

$$P_{\text{эд}} = P_{\text{в75}} (k_r - 1) = 129 (1,07 - 1) = 9,05 \text{ кет.}$$

Добавочные потери в зубцах статора от третьей гармоники поля при коротком замыкании

$$P_{\text{кз}} = 10,7 p_{10/90} \left(\frac{B_3}{10000} \right)^{5/4} G_z 10^{-3} = \\ = 10,7 \cdot 1,5 \left(\frac{2960}{10000} \right)^{5/4} \cdot 11500 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ кет,}$$

где

$$B_3 = B_{z0} [A_{3\text{м}} x_d + 1,27 A_{3\text{д}} x_{\text{ад}}] = \\ = 17400 [0,127 \cdot 0,792 + 1,27 \cdot 0,086 \cdot 0,635] = 2960 \text{ гс,}$$

$$A_{3\text{м}} = A_1 B_1 - 0,7 = 1,8 \cdot 0,46 - 0,7 = 0,127,$$

$$A_{3\text{д}} = A_1 A_2 = 0,43 \cdot 0,2 = 0,086.$$

Добавочные потери на поверхности полюсных наконечников от зубчатости кривой н. с. статора при коротком замыкании

$$P_{\text{рк}} = k' \left[\frac{2p x_{\text{ад}}}{z (k_{\delta 1} - 1)} \right]^2 P_{\text{р0}} = 0,2 \left[\frac{48 \cdot 0,635}{378 (1,08 - 1)} \right]^2 12,7 = 2,6 \text{ кет.}$$

Добавочные потери на поверхности полюсного наконечника от высших гармонических н. с. статора при коротком замыкании

$$P_{\text{рк}} = \frac{2,1}{\sqrt{q}} \left[\frac{k_0 x_{\text{ад}}}{k_{\delta 1} - 1} \right]^2 P_{\text{р0}} = \frac{2,1}{\sqrt{2,7}} \left[\frac{0,02 \cdot 0,635}{1,08 - 1} \right]^2 12,7 = 0,4 \text{ кет.}$$

Сумма добавочных потерь при коротком замыкании

$$P_{\text{кд}} = P_{\text{эд}} + P_{\text{кз}} + P_{\text{рк}} + P_{\text{рк}} = 9,05 + 40 + 2,6 + 0,4 = 52 \text{ кет.}$$

Полные потери короткого замыкания при номинальном токе статора

$$P_{\text{кн}} = P_{\text{в75}} + P_{\text{кд}} = 129 + 52 = 181 \text{ кет.}$$

Потери на возбуждение (с учетом потерь в возбuditеле и переходном контакте щеток при 75°C)

$$P_{\text{в}} = \frac{(r_{\text{в}} I_{\text{в}}^2 + \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{в}}) 10^{-3}}{\eta_{\text{в}}} = \frac{(0,137 \cdot 1210^2 + 2 \cdot 1210) 10^{-3}}{0,85} = 238 \text{ кет.}$$

Механические потери

Потери на вентиляцию

$$P_{\text{в}} = c_v Q = 3,08 \cdot 16,85 = 52 \text{ кет,}$$

где

$$c_v = 0,122 k_0 \left(\frac{v}{10} \right)^2 = 0,122 \cdot 1,4 \left(\frac{42,5}{10} \right)^2 = 3,08,$$

$$Q = \frac{P_{\text{в}} + P_{\text{р}} + 0,5 (P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}})}{1,10 - c_v} = \frac{238 + 16 + 0,5 (139 + 180,7)}{1,1 \cdot 25 - 3,08} = 16,85 \text{ м}^3/\text{сек,}$$

$$P_{\text{р}} = P_{\text{р0}} + P_{\text{рк}} + P_{\text{рк}} = 12,7 + 2,6 + 0,4 \approx 16 \text{ кет,}$$

$$P_{\text{Cu}} = P_{\text{в75}} + P_{\text{эд}} = 129 + 9,05 \approx 139 \text{ кет,}$$

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{м}} + P_{\text{кз}} = 140,7 + 40 \approx 180,7 \text{ кет.}$$

Потери на трение в подпятнике и направляющем подшипнике (предварительно)

$$P_{\text{п}} = A (G_{\text{пр}})^{1,5} \cdot 10^{-6} = 4,8 (487 \cdot 125)^{1,5} \cdot 10^{-6} = 70 \text{ кет.}$$

Суммарные механические потери вертикального гидрогенератора

$$P_{\text{т}} \approx 52 + 0,5 \cdot 70 = 87 \text{ кет.}$$

Полные потери и коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

Полные потери при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{\text{м0}} + P_{\text{кн}} + P_{\text{в}} + P_{\text{т}} = 153,4 + 181 + 238 + 87 \approx 660 \text{ кет.}$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{S_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} + \Sigma P} = 1 - \frac{660}{26200 \cdot 0,8 + 660} = 0,9695.$$

После уточнения вентиляционных потерь (§ 6-3) коэффициент полезного действия следует пересчитать.

§ 6-2. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Расчет крепления полюсов (§ 4-1)

Крепление полюсов осуществляется при помощи хвостов. Средний радиус центра тяжести полюса

$$r_{\text{м}} \approx H + \frac{1}{2} h_{\text{мп}} = 293 + \frac{30,3}{2} \approx 308 \text{ см,}$$

где

$$H = \frac{D_{\text{а2}}^2 \cdot 586}{2} = \frac{293 \text{ см}}{2} = 293 \text{ см;}$$

$$h_{\text{мп}} = h_{\text{м}} + h_{\text{р}} = 25 + 5,3 = 30,3 \text{ см.}$$

Вес катушки на 1 см длины полюса

$$G'_{мв} = 18,7a_0b_0\omega_p \cdot 10^{-3} = 18,7 \cdot 0,935 \cdot 4,48 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 1,57 \text{ кг/см.}$$

Вес сердечника полюса на 1 см длины

$$G'_m = s_p 7,8 \cdot 10^{-3} = 694 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 5,4 \text{ кг,}$$

где

$$s_p = h_m b_m + 0,8 h_p b_p = 25 \cdot 22,5 + 0,8 \cdot 5,3 \cdot 31 = 694 \text{ см}^2.$$

Центробежная сила полюса на 1 см длины

$$\begin{aligned} C'_m &= 0,112 Q_m (G'_{мв} + G'_m) \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 = \\ &= 0,112 \cdot 308 (1,57 + 5,4) \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 1880 \text{ кг/см,} \end{aligned}$$

где

$$n_{\text{макс}} = n_n k_{\text{уг}} = 125 \cdot 2,24 = 280 \text{ об/мин.}$$

По табл. 4-1 можно выбрать непроваренный хвост № 3, допускающий нагрузку 2100 кг/см при толщине листа 1,5 мм, или хвост № 4, допускающий нагрузку 2200 кг/см. Выбираем хвост № 4, который крепят клиньями большего сечения, что облегчает сборку ротора при относительно большой длине машины.

Расчет межполюсных распорок (§ 4-2)

Наибольшее растягивающее напряжение в меди катушки

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Cu макс}} &= \frac{R}{2b_0} (2R + L)^2 \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 k \cdot 10^{-3} = \\ &= \frac{13,9}{2 \cdot 4,48} (2 \cdot 13,9 + 93,2)^2 \cdot \left(\frac{280}{100} \right)^2 \cdot 0,89 \cdot 10^{-3} = 158 \text{ кг/см}^2, \end{aligned}$$

где $k = 0,89$ — по кривой (рис. 4-5) для $\mu = \frac{R}{L} = \frac{13,9}{93,2} = 0,149$;

L — прямолинейная часть витка, см,

$$L = l_m - 2\delta_0 = 100 - 2 \cdot 3,4 = 93,2;$$

$$\delta_0 = 0,15 b_m = 0,15 \cdot 22,5 = 3,4 \text{ см (рис. 3-5);}$$

R — средний радиус закругления витка, см,

$$R = \frac{b'_m + b_0}{2} = \frac{23,3 + 4,48}{2} \approx 13,9.$$

Так как $\sigma_{\text{Cu макс}} < 500 \text{ кг/см}^2$, межполюсные распорки можно не ставить.

Расчет кромки полюсного наконечника (§ 4-3)

Центробежная сила 1 пог. см обмотки

$$\begin{aligned} C_b &= 1,04 a_0 b_0 \omega_p Q_b \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,04 \cdot 0,935 \cdot 4,48 \cdot 20 \cdot 305,5 \left(\frac{280}{100} \right)^2 \cdot 10^{-3} = 209 \text{ кг/см,} \end{aligned}$$

где Q_b — расстояние от оси вращения до центра тяжести обмотки, см,

$$Q_b \approx \frac{D_{a2}}{2} + \frac{h_m}{2} = \frac{586}{2} + \frac{25}{2} = 305,5.$$

Центробежная сила 1 пог. см кромки полюса

$$C_{\text{кр}} = 0,112 G_{\text{кр}} Q_{\text{кр}} \left(\frac{n_{\text{макс}}}{100} \right)^2 = 0,112 \cdot 0,087 \cdot 319 \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 24,4 \text{ кг/см,}$$

где $G_{\text{кр}}$ — вес 1 см кромки полюса, кг/см,

$$G_{\text{кр}} = 7,8 \cdot S_{A'VEF} \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 11,2 \cdot 10^{-3} = 0,087;$$

$S_{A'VEF}$ — площадь кромки полюса (рис. 6-5), см²,

$$S_{A'VEF} \approx \frac{1}{2} (BE + A'F) h'_p = \frac{1}{2} (1,3 + 4,3) \cdot 4 = 11,2;$$

$Q_{\text{кр}}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести кромки полюса, см,

$$Q_{\text{кр}} \approx \frac{D_{a2}}{2} + h_m + \frac{1}{3} h'_p = \frac{586}{2} + 25 + \frac{1}{3} \cdot 4 \approx 319.$$

Изгибающий момент в сечении $A'A''$ кромки полюса

$$M_{\text{из}} = C_b l'_b + C_{\text{кр}} l'_{\text{кр}} = 209 \cdot 1,8 + 24,4 \cdot 1,6 = 415 \text{ кг,}$$

где $l'_b = 1,8 \text{ см}$, $l'_{\text{кр}} = 1,6 \text{ см}$ — плечи сил C_b и $C_{\text{кр}}$ (рис. 6-5).

Напряжение в кромке полюса от изгиба при угонной скорости

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{6M_{\text{из}}}{h_{\text{к}}^2} = \frac{6 \cdot 415}{42} = 155 \text{ кг/см}^2,$$

где $h_{\text{к}} = A'A'' = 4 \text{ см}$;

$\sigma_{\text{из}}$ — меньше допустимого $\sigma_{\text{из доп}}$, равного 1000 кг/см² при толщине листов 1,5 мм.

Расчет щеки полюса (§ 4-4)

Расчет щеки полюса производят после выбора ее конструкции.

Простейшая конструкция щеки показана на рис. 4-7, а.

Размеры щеки даются в соответствии с обозначениями (рис. 4-7). Размеры козырька щеки:

$$h = 2,6 \text{ см; } h_1 = 1,8 \text{ см; } b_{\text{к}} = 31 \text{ см.}$$

Размеры хвоста щеки (рис. 4-1) соответствуют размерам хвоста № 4 полюса: $a = 3,2$ см; $b = 6,5$ см; $c = 5,8$ см; $e = 3,2$ см. Толщина (длина) хвоста равна длине щеки $l_{щ} = 7$ см. Вес щеки $G_{щ} = 32$ кг. Вес обмотки, удерживаемой козырьком щеки, $G_{щк} = 27$ кг. Другие необходимые для расчета размеры берут из чертежа полюса: $K = 5,3$ см, $R_2 = 16$ см (рис. 4-7, а), $Q_{щ} \approx Q_b = 305,5$ см.

Момент центробежных сил лобовой части обмотки относительно хорды $A - A$ (рис. 4-7)

$$M_{л} = 1,05 \cdot a_3 \omega_b \varrho_b B R_2^3 \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2 10^{-3} = \\ = 1,05 \cdot 0,935 \cdot 20 \cdot 305,5 \cdot 0,011 \cdot 16^3 \left(\frac{280}{100} \right)^2 10^{-3} = 2120 \text{ кгсм},$$

где $B = 0,011$ по кривой (рис. 4-7, в) для

$$\cos \alpha = 1 - \frac{k}{R_2} = 1 - \frac{5,3}{27,8} = 0,81.$$

Момент сопротивления козырька щеки

$$W = \frac{bh^2}{6} \varphi = \frac{31 \cdot 2,6^2}{6} \cdot 0,6 = 21 \text{ см}^3,$$

где $\varphi = 0,6$ по кривой (рис. 4-7, е) для $\mu = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1,8}{2,6} \approx 0,7$.

Напряжение изгиба в сечении $A - A$ козырька щеки при угонной скорости

$$\sigma_{и} = \frac{1,15}{W} M_{и} = \frac{1,15}{21} 2120 = 116 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение растяжения в хвосте щеки при угонной скорости

$$\sigma_s = 0,112 \frac{G_{щ} + G_{щк}}{m l_{щ а}} Q_{щ} \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2 = 0,112 \frac{32 + 27}{1 \cdot 7 \cdot 3,2} 305,5 \times \\ \times \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 706 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение изгиба в сечении $A - A$ козырька щеки и напряжение растяжения в хвосте щеки не превышают допустимых.

Расчет обода ротора (§ 4-5)

Обод ротора выполнен из стальных (Ст. 3) сегментов толщиной $\Delta_c = 4$ мм. Длина обода $l_{a2} = 1300$ мм выбрана в § 6-1. Высоту обода ротора принимаем ориентировочно равной $h_{a2} = 42,5$ см (высоту обода ротора первоначально принимают примерно равной полюсному делению и уточняют в дальнейшем расчете).

Число сегментов, укладываемых на окружности обода ротора,

$$n_{\text{сегм}} = \frac{2p}{s} = \frac{48}{6} = 8;$$

число полюсных делений, размещенных на одном сегменте, принимаем $s = 6$.

Число слоев сегментов в обode

$$N = k_c \frac{l_{a2}}{\Delta_c} = 0,885 \frac{1300}{4} = 290,$$

где коэффициент $k_c = 0,885$ соответствует трем каналам в обode ротора длиной 5 см каждый (выбрано в вентиляционном расчете).

Число слоев сегментов в элементарном обode

$$u = \frac{s}{\phi} = \frac{6}{1} = 6.$$

Вес обода ротора без хвостовой зоны

$$G'_0 = \pi (2R_2 - h'_{a2}) h'_{a2} l_{a2} k_c k_{\text{ш}} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = \\ = 3,14 (2 \cdot 283,8 - 33,3) 33,3 \cdot 130 \cdot 0,885 \cdot 0,98 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 49300 \text{ кг},$$

где $R_2 = \frac{D_{a2}}{2} - h_{\text{пх}} = 293 - 9,2 = 283,8$ см (рис. 4-2 и 4-8), $h'_{a2} = h_{a2} - h_{\text{пх}} = 42,5 - 9,2 = 33,3$ см,

$h_{\text{пх}} = h + n = 6 + 3,2 = 9,2$ см (рис. 4-1 и табл. 4-1),

$$k_c k_{\text{ш}} = 0,885 \cdot 0,98 \approx 0,87.$$

Центробежная сила обода ротора без хвостовой зоны

$$C_0 = 0,112 \varrho_0 G'_0 \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2 = 0,112 \cdot 267,2 \cdot 49300 \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 116 \cdot 10^5 \text{ кг},$$

где

$$\varrho_0 = R_2 - \frac{h_{a2}}{2} = 283,8 - \frac{33,3}{2} = 267,2 \text{ см}.$$

Вес хвостовой зоны

$$G_{\text{хз}} = \pi (2R_2 + h_{\text{пх}}) h_{\text{пх}} l_{a2} k_c k_{\text{ш}} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = \\ = 3,14 (2 \cdot 283,8 + 9,2) 9,2 \cdot 130 \cdot 0,885 \cdot 0,98 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 14700 \text{ кг}.$$

Центробежная сила хвостовой зоны

$$C_{\text{хз}} = 0,112 G_{\text{хз}} (2R_2 + h_{\text{пх}}) \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2 = \\ = 0,112 \cdot 14700 (2 \cdot 283,8 + 9,2) \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 74,5 \cdot 10^5 \text{ кг}.$$

Центробежная сила полюсов

$$C_m = 0,112 Q_m (G_{\text{мв}} + G_c + G_k + G_m) \left(\frac{n_{\max}}{100} \right)^2 = \\ = 0,112 \cdot 308 (9770 + 600 + 215 + 26300) \left(\frac{280}{100} \right)^2 = 100 \cdot 10^5 \text{ кг},$$

где $G_{\text{мв}}$ — вес медной обмотки полюсов (из § 6-1);
 G_c — вес стержней демпферной обмотки;

G_k — вес колец демпферной обмотки;
 G_m — вес сердечников полюсов.

Растягивающее усилие на одностороннее сечение элементарного обода от центробежных сил обода, хвостовой зоны и полюсов

$$C_{II} = \frac{C_0 + C_{x3} + C_m}{2\pi} \cdot \frac{u}{N} = \frac{116 \cdot 10^5 + 74,5 \cdot 10^5 + 100 \cdot 10^5}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{6}{290} = 9,55 \cdot 10^4 \text{ кг.}$$

Растягивающие напряжения в листах (сегментах) обода при угонной скорости вращения

$$\sigma_s = \frac{C_{II}}{(u-1) h_{\text{мин}} \Delta_c} = \frac{9,55 \cdot 10^4}{(6-1) \cdot 30,3 \cdot 0,4} = 1575 \text{ кг/см}^2,$$

где

$$h_{\text{мин}} = b'_0 - d_{\text{ш}} = 33,3 - 3 = 30,3 \text{ см.}$$

d — диаметр шпильки, см, $d_{\text{ш}} = 3$.

Учитывая, что в крупных генераторах принимают

$$\sigma'_{s \text{ доп}} = 1,15 \sigma_s \text{ доп} = 1,15 \cdot 1500 = 1730 \text{ кг/см}^2 \text{ и } \sigma_s < \sigma'_{s \text{ доп}},$$

можно оставить принятые размеры обода.

Число стяжных шпилек, приходящееся на полюсное деление сегмента,

$$b_{\text{ш}}'' = \frac{4C_{II}}{\sigma_t \text{ доп} \Phi (u-1) \pi d_{\text{ш}}^2} = \frac{4 \cdot 9,55 \cdot 10^4}{750 \cdot 1 (6-1) \cdot 3,14 \cdot 3^2} = 3,62.$$

Принимаем $b_{\text{ш}}'' = 4$.

Допустимые напряжения для стали Ст. 3 на срез в шпильках $\sigma'_{\text{ш доп}} = 750 \text{ кг/см}^2$.

Напряжение среза в шпильках

$$\sigma_t = \sigma_t \text{ доп} \frac{b_{\text{ш}}''}{b_{\text{ш}}} = 750 \frac{3,62}{4} = 680 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжения смятия в листах сегментов (в местах отверстий под стяжные шпильки)

$$\sigma_d = \frac{\pi d_{\text{ш}}}{4 \Delta_c} \sigma_t = \frac{3,14 \cdot 3}{4 \cdot 0,4} \cdot 680 = 3750 \text{ кг/см}^2.$$

Допустимое напряжение на смятие для стали Ст. 3 $\sigma_{d \text{ доп}} = 3000 \text{ кг/см}^2$. Из условий смятия выбираем $b_{\text{ш}} = 5$. При этом

$$\sigma_t = 750 \frac{3,62}{5} = 540 \text{ кг/см}^2,$$

$$\sigma_d = \frac{3,14 \cdot 3}{4 \cdot 0,4} \cdot 540 = 3180 \text{ кг/см}^2.$$

Значение напряжения смятия близко к значению $\sigma_{d \text{ доп}}$, поэтому оставляем $b_{\text{ш}} = 5$.

Расчет махового момента ротора (§ 4-6)

Расчет махового момента ротора со спицевым остовом проводим по формуле (4-55)

$$GD_p^2 = 4G_{\text{тм}} c_{\text{тм}}^2 \cdot 10^{-3} + k_0 G_0 \frac{D_{c2}^2 + (D'_{c2})^2}{2} \cdot 10^{-3} = \\ = 4 \cdot 36900 \cdot 3,08^2 \cdot 10^{-3} + 1,1 \cdot 64000 \frac{5,86^2 + 5,68^2}{2} \cdot 10^{-3} = 3740 \text{ Тм}^2.$$

Значение махового момента близко к значению требуемого минимального $GD_p^2 = 3670 \text{ Тм}^2$, рассчитанному в § 6-1, б.

§ 6-3. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТЫ (§ 5-1 и 5-2)

Определение расхода воздуха в вентиляционной системе гидрогенератора

Сечение воздушного зазора

$$s_8 = 2\pi r_l 10^{-4} = 2 \cdot 24 \cdot 42,5 \cdot 104 \cdot 10^{-4} = 21,2 \text{ м}^2.$$

Сечение входа в вентиляционные каналы статора

$$s_c = [\pi D - z(b_{\text{п}} + b_p)] n_b b_b 10^{-4} = \\ = [\pi 650 - 378(2,26 + 0,4)] \cdot 18 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 1,87 \text{ м}^2,$$

что составляет 9,45% от s_8 .

Сечение входа в воздухоохладители

$$s_{\text{охл}} = \frac{Q}{v_{\text{охл}}} = \frac{16,85}{2,23} = 7,55 \text{ м}^2,$$

что составляет 35,5% от s_8 .

Здесь $Q = 16,85 \text{ м}^3/\text{сек}$ — требуемый для охлаждения генератора расход воздуха;

$$v_{\text{охл}} = 0,1 + 0,05 \tau = 0,1 + 0,05 \cdot 42,5 = 2,23 \text{ м/сек.}$$

Сечение входа в межполюсное пространство с торцовых сторон

$$s_{\text{ш}} = 4r_{\text{сш}} h_{\text{ш}} 10^{-4} = 4 \cdot 24 \cdot 8,1 \cdot 30,3 \cdot 10^{-4} = 2,36 \text{ м}^2,$$

где

$$a_{\text{сш}} = \frac{\tau - b_{\text{сш}}}{2} + \frac{x}{2} = \frac{42,5 - 32,3}{2} + \frac{6}{2} = 8,1 \text{ см.}$$

$$b_{\text{сш}} = b'_m + 2b_8 = 23,3 + 2 \cdot 4,48 = 32,3 \text{ см.}$$

$$x = 6,0 \text{ см.}$$

Сечение входа воздуха в воздушный зазор с торцовых сторон

$$s_{\text{п2}} = 4\pi r_l 10^{-4} = 4 \cdot 24 \cdot 42,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 0,733 \text{ м}^2.$$

Сечение входа в межполюсное пространство

$$s_{пз} = 2\rho x_c n_{a2} b_{a2} 10^{-4} = 2 \cdot 24 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0,286 \text{ м}^2,$$

где $b_{a2} = 5 \text{ см}$, $n_{a2} = 3$,

$$b_{a2} n_{a2} = 5 \cdot 3 \geq 0,1 l_{a2} = 0,1 \cdot 130 = 13 \text{ см}.$$

Сечение входа воздуха в межполюсное пространство через прямоугольные каналы между соседними сегментами обода ротора

$$s_{п4} = 2\rho x_c \Delta n_{д} 10^{-4} = 2 \cdot 24 \cdot 4 \cdot 0,4 \cdot 48 \cdot 10^{-4} = 0,365 \text{ м}^2,$$

где

$$n_{д} = \frac{(l_{a2} - n_{a2} b_{a2})}{u \Delta} = \frac{130 - 3 \cdot 5}{6 \cdot 0,4} = 48.$$

Суммарное сечение входа воздуха в межполюсное пространство

$$s_{п} = s_{п1} + s_{п2} + s_{п3} + s_{п4} = 2,36 + 0,733 + 0,286 + 0,365 = 3,74 \text{ м}^2,$$

что составляет 19,2% от s_8 .

Коэффициент добротности вентиляционной системы ротора (рис. 5-1) $\Phi_{д} = 0,9$.

Коэффициент воздухопровода (для средних условий)

$$k = \frac{700 \cdot \Phi_{д}}{s_8 + \frac{s_8}{s_c}} = \frac{700 \cdot 0,9}{21,2 + \frac{21,2}{1,87 + 3,74}} = 37,3.$$

Расход воздуха, который может обеспечить вентиляционная система гидрогенератора при принятых размерах (предварительно)

$$Q = k \tau l_1 \sqrt{\rho \tau h_{mp}} =$$

$$= 37,3 \cdot 0,425 \cdot 1,04 \sqrt{24 \cdot 0,425 \cdot 0,303} = 28,9 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Имея в виду, что расход воздуха получается чрезмерно большим, можно упростить вентиляционную систему генератора и снизить сечение охладителей до $6,3 \text{ м}^2$ (30% от s_8). При этом $\Phi_{д} = 0,8$; $k = 33,2$ и $Q = 25,7 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Потери на вентиляцию и трение о воздух (при уточненном расходе воздуха)

$$P_v = c_v Q = 3,08 \cdot 25,7 = 79 \text{ кВт},$$

где $c_v = 3,08$ (см. § 6-1).

Определение превышения температуры обмотки и сердечника статора

Потери в обмотке на протяжении пакетного деления

$$P_{Cu} = \frac{(P_a + P_{ад}) (l_1 + b_{в})}{l_{ср}} 10^3 = \frac{(129 + 9,05)(4,5 + 1,0)}{187} 10^3 = 4060 \text{ вт}.$$

Потери в сердечнике на одно пакетное деление

$$P'_{Fe} = \frac{P_m + P_{кз}}{n_B + 1} 10^3 = \frac{(140,7 + 40)}{18 + 1} 10^3 = 9500 \text{ вт}.$$

Тепловое сопротивление изоляции в вентиляционном канале

$$R_i = \frac{\delta_{и}}{\lambda b_{в} l_{п}} = \frac{0,54}{0,016 \cdot 1 \cdot 10700} = 0,0316 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{вт},$$

где

$$l_{п} = 2z (h_{п} - h_{кп}) = 2 \cdot 378 (15 - 0,9) = 10700 \text{ см}.$$

Тепловое сопротивление при переходе тепла с поверхности изоляции к воздуху в канале

$$R_{п} = \frac{1}{\alpha_{в1} b_{в} l_{п}} = \frac{1}{6,13 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 107 \cdot 10^3} = 0,0152 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{вт},$$

где

$$\alpha_{в1} = 1,33 (1 + \sqrt{v_{в1}}) 10^{-3} =$$

$$= 1,33 (1 + \sqrt{13,1}) 10^{-3} = 6,13 \cdot 10^{-3} \text{ вт}/\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C},$$

$$v_{в1} = \frac{Q}{s_c} = \frac{25,7}{1,96} = 13,1 \text{ м}/\text{сек},$$

$$s_c = [\pi (D + h_{п}) - z (b_u + b_p)] n_{в} b_{в} 10^{-4} =$$

$$= [\pi (650 + 15) - 378 (2,26 + 0,4)] 18 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 1,96 \text{ м}^2.$$

Тепловое сопротивление пазовой изоляции в пределах пакета

$$R_{п1} = \frac{\delta_{и}}{\lambda l_{п}} = \frac{0,54}{0,0016 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 10700} = 0,00702 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{вт}.$$

Тепловое сопротивление от пакета к воздуху

$$R_{п1v} = 0,78 R_{2п} = \frac{0,78}{\alpha_{в1} s_2} = \frac{0,78}{7,81 \cdot 10^{-3} \cdot 8,9 \cdot 10^4} = 0,00113 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{вт},$$

где

$$s_2 = 2 [0,785 (D_a^2 - D^2) - b_{п} h_{п} z] 10^{-4} =$$

$$= 2 [0,785 (704^2 - 650^2) - 2,26 \cdot 15 \cdot 378] = 8,9 \cdot 10^4 \text{ см}^2,$$

$$\alpha_{в1} = 1,67 (1 + \sqrt{v_{в1}}) 10^{-3} =$$

$$= 1,67 (1 + \sqrt{13,1}) 10^{-3} = 7,81 \cdot 10^{-3} \text{ вт}/\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Среднее превышение температуры воздуха в вентиляционном канале статора

$$\theta_{г1} = \frac{P_{в} + P_v + P_p}{1,1 Q} + 0,5 \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{1,1 Q} =$$

$$= \frac{238 + 79 + 16}{1,1 \cdot 25,7} + 0,5 \frac{139 + 180,7}{1,1 \cdot 25,7} = 17,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры обмотки статора над температурой охлажденного воздуха

$$\theta_{Cu} = \frac{(R_I + R_{II}) [P_{Cu} (R_{III} + R_{IV}) + P_{Fe} R_{IV}] + \theta_{r1}}{R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV}} + \theta_{r1} =$$

$$= \frac{(0,0316 + 0,0152) [4060 (0,00702 + 0,00113) + 9500 \cdot 0,00113]}{0,0316 + 0,0152 + 0,00702 + 0,00113} + 17,4 = 58,6^\circ \text{C}.$$

Превышение температуры сердечника над температурой охлажденного воздуха

$$\theta_{Fe} = \frac{R_{IV} [(R_I + R_{II}) (P_{Fe} + P_{Cu}) + P_{Fe} R_{III}] + \theta_{r1}}{R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV}} + \theta_{r1} =$$

$$= \frac{0,00113 [(0,0316 + 0,0152) (9500 + 4060) + 9500 \cdot 0,00702]}{0,0316 + 0,0152 + 0,00702 + 0,00113} + 17,4 = 32,1^\circ \text{C}.$$

Определение превышения температуры обмотки ротора

Превышение температуры обмотки над температурой охлаждающего воздуха

$$\theta_B = P'_B R_B = 0,765 \cdot 63,5 = 48,6^\circ \text{C},$$

где

$$P'_B = 0,218 \Delta_{BВ} 10^{-3} = 0,218 \cdot 2,89 \cdot 418 \cdot 10^{-3} = 0,765 \text{ вт},$$

$$\Delta_B = \frac{1210}{418} = 2,89 \text{ а/мм}^2,$$

$$R_B = \frac{1}{\alpha_{B2} s_{B2}} = \frac{1}{8,42 \cdot 10^{-3} \cdot 1,87} = 63,5^\circ \text{C/вт},$$

$$\alpha_{B2} = 1,67 (1 + \sqrt{v_{B2}}) 10^{-3} = 1,67 (1 + \sqrt{16,4}) 10^{-3} =$$

$$= 8,42 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \text{C},$$

$$v_{B2} \approx 1,25 v_{B1} = 1,25 \cdot 13,1 = 16,4 \text{ м/сек},$$

$$s_{B2} = 2a_B = 2 \cdot 0,935 = 1,87 \text{ см}^2,$$

где a_B — высота провода обмотки возбуждения, $a_B = 0,935$ см. Среднее превышение температуры воздуха в межполюсном пространстве

$$\theta_{r2} = \frac{0,5(P_B + P_v)}{1,1Q} = \frac{0,5(2,38 + 79)}{1,1 \cdot 25,7} = 5,4^\circ \text{C}.$$

Превышение температуры обмотки возбуждения над температурой входящего воздуха

$$\theta_B = \theta'_B + \theta_{r2} = 48,6 + 5,4 = 54^\circ \text{C}.$$

Как видно из табл. 5-1, превышения температуры обмотки и стали находятся в допустимых пределах.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Данные обмоточных проводов медной проволоки и лент

Таблица П1-1

Номинальные размеры и расчетные сечения прямоугольных медных голых проводов

(по ГОСТам 6324—52 и 434—53)

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	0,9	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	1,56	1,68	
2,10	1,89	2,06	2,23	2,41	2,42	2,63	2,84	3,07	3,32	
2,26	2,05	2,23	2,41	2,62	2,62	2,84	3,07	3,32	3,59	
2,44	2,23	2,43	2,62	2,84	3,08	3,34	3,60	3,89	4,21	
2,63	2,42	2,63	2,85	3,07	3,33	3,61	3,89	4,20	4,54	
2,83	2,62	2,85	3,07	3,33	3,60	3,91	4,21	4,55	4,91	
3,05	2,84	3,08	3,33	3,60	3,89	4,22	4,55	4,91	5,30	
3,28	3,07	3,33	3,60	3,89	4,20	4,56	4,91	5,30	5,72	
3,53	3,32	3,69	3,89	4,20	4,54	4,92	5,30	5,72	6,17	
3,8	3,59	3,89	4,20	4,55	4,92	5,33	5,74	6,19	6,68	
4,1	3,89	4,22	4,55	4,89	5,29	5,73	6,17	6,65	7,18	
4,4	4,19	4,54	4,87	5,24	5,67	6,14	6,61	7,12	7,79	
4,7	4,49	4,87	5,24	5,61	6,17	6,88	7,19	7,75	8,36	
5,1	4,89	5,30	5,71	6,17	6,67	7,22	7,77	8,37	9,03	
5,5	5,29	5,73	6,16	6,63	7,17	7,76	8,35	8,99	9,70	
5,9	5,69	6,16	6,63	7,17	7,79	8,43	9,07	9,77	10,60	
6,4	6,19	6,70	7,21	7,79	8,42	9,11	9,79	10,60	11,40	
6,9	6,69	7,24	7,79	8,42	9,04	9,78	10,50	11,30	12,60	
7,4	7,19	7,78	8,37	9,04	9,79	10,60	11,40	12,30	13,20	
8,0	7,79	8,43	9,07	9,79	10,60	11,40	12,30	13,20	14,20	
8,6	8,39	9,08	9,77	10,60	11,40	12,40	13,30	14,30	15,40	
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10,0	—	—	—	11,4	—	—	—	—	—	
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Продолжение табл. П1-1

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05		
2,10	3,59	—	3,92	—	—	—	—	—	—	
2,26	3,83	—	—	4,63	—	—	—	—	—	
2,44	4,21	—	—	—	5,37	—	—	—	—	
2,63	4,55	4,55	4,64	—	5,94	6,44	—	—	—	
2,83	4,91	4,92	5,04	5,92	6,43	—	7,53	—	—	

Продолжение табл. П1-1

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05		
3,05	5,31	5,74	5,93	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72		
3,28	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52	8,15	8,80	—		
3,53	6,18	6,67	6,93	7,50	8,13	8,80	9,51	10,30		
3,8	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,30	11,10		
4,1	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,30	11,10	12,00		
4,4	7,75	8,37	8,76	9,46	10,20	11,10	12,00	12,90		
4,7	8,30	8,96	9,39	10,10	11,00	11,90	12,80	13,80		
5,1	9,02	9,74	10,20	11,00	11,90	12,90	13,90	15,10		
5,5	9,75	10,50	11,10	11,90	12,90	14,60	15,10	16,30		
5,9	10,50	11,30	11,90	12,80	13,90	15,00	16,20	17,50		
6,4	11,40	12,30	12,90	14,00	15,10	16,30	17,60	19,00		
6,9	12,30	13,30	14,00	15,10	16,30	17,70	19,00	20,6		
7,4	13,30	14,20	15,00	16,20	17,60	19,00	20,4	22,1		
8,0	14,40	15,40	16,30	17,60	19,00	20,5	22,1	23,9		
8,6	15,50	16,60	17,60	18,90	20,5	22,1	23,8	25,7		
9,3	16,60	17,90	19,00	20,5	22,2	24,0	25,8	27,9		
10,0	17,90	19,30	20,5	22,1	23,9	25,8	27,8	30,0		
10,8	19,30	20,90	22,2	23,9	25,9	27,9	30,1	32,4		
11,6	—	—	23,9	25,7	27,8	30,0	32,3	34,9		
12,5	—	—	25,8	27,8	30,0	32,4	34,9	37,6		
13,5	—	—	—	—	32,4	35,0	37,7	40,7		
14,5	—	—	—	—	34,9	37,6	40,5	43,7		

Продолжение табл. П1-1

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70	5,10	5,50		
2,10	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,26	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,44	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,63	—	—	—	—	—	—	—	—		
2,83	—	—	—	—	—	—	—	—		
3,05	—	—	—	—	—	—	—	—		
3,28	10,30	—	—	—	—	—	—	—		
3,53	11,10	12,00	—	—	—	—	—	—		
3,8	12,00	—	13,90	—	—	—	—	—		
4,1	13,00	14,00	15,10	15,90	—	—	—	—		
4,4	13,90	15,00	16,20	17,10	18,50	—	—	—		
4,7	14,90	16,10	17,40	18,40	—	—	—	—		
5,1	16,20	17,50	18,90	20,0	21,5	21,1	25,1	—		
5,5	17,50	18,90	20,4	21,7	23,3	25,0	29,2	—		
5,9	18,90	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	31,7	—		
6,4	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	34,3	—		
6,9	22,1	23,9	25,7	27,4	29,5	31,5	37,1	—		

Продолжение табл. П1-1

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70	5,10	5,50		
7,4	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,0	39,8		
8,0	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7	39,9	43,1		
8,6	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5	43,0	46,4		
9,3	30,0	32,3	34,8	37,2	40,0	42,8	46,5	50,5		
10,0	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1	50,1	54,1		
10,8	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5		
11,6	35,7	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9		
12,5	40,5	43,6	47,0	50,4	54,1	57,9	62,9	67,9		
13,5	43,8	47,2	50,8	54,5	58,5	62,6	68,0	73,4		
14,5	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74,1	78,9		

Примечание. Расчетные сечения даны с учетом закругления углов поперечных сечений.

Таблица П1-2

Номинальные размеры медной прямоугольной проволоки, лент (мм) и расчетные сечения (мм²) (по ГОСТ 434—53)

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	1,81	1,95	2,0	2,1	2,26	2,44	2,5			
15,6	28,0	30,2	—	32,3	34,8	37,6	—	—		
16	(29,7)	—	—	34,8	37,5	40,5	39,5	—		
18	(31,9)	(34,3)	—	37,3	40,2	43,4	—	—		
19,5	(34,6)	(37,2)	—	(40,0)	43,6	47,1	—	—		
20	—	—	(39,1)	—	—	—	49,5	—		
22	(39,1)	(42,1)	—	(45,3)	(48,6)	(52,4)	—	—		
25	(44,6)	(47,9)	(49,1)	(51,6)	(55,4)	(59,7)	(61,2)	—		
26,3	(46,9)	(50,5)	—	(54,3)	(58,3)	(62,8)	—	—		
28	(50,0)	(53,8)	—	(57,9)	(62,2)	(67,0)	(73,7)	—		
30	(53,6)	(57,7)	(59,1)	(62,1)	(66,7)	(71,9)	—	—		
32	—	—	—	—	(71,3)	(76,8)	—	—		
35	—	—	—	—	—	—	—	—		

Продолжение табл. П1-2

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	2,63	2,83	3,0	3,05	3,28	3,53	3,8			
15,6	40,5	43,7	—	47,1	50,7	54,6	58,8			

Продолжение табл. П1-2

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм										
	2,63	2,83	3,0	3,05	3,28	3,53	3,8				
16	43,7	47,0	47,5	50,7	54,6	58,8	63,3				
16,8	46,8	50,4	—	54,4	58,5	63,0	67,9				
18	50,8	54,7	—	59,0	63,5	68,3	73,6				
19,5	57,4	61,8	—	66,6	71,7	77,2	83,1				
22	(64,3)	70,3	74,5	75,8	81,5	88,3	94,5				
25	(67,2)	(72,7)	—	79,7	85,8	92,3	99,4				
26,3	(72,2)	(77,5)	(82,1)	—	91,3	98,3	105,9				
28	(77,4)	(83,2)	(88,1)	—	105,3	113,1	121,5				
30	(82,7)	(88,9)	(94,1)	—	(102,7)	(110,3)	118,5				
32	—	—	(103,1)	—	(112,5)	(120,9)	129,5				
35	—	—	—	—	—	—	—				

Продолжение табл. П1-2

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм										
	4,0	4,1	4,4	4,7	5,0	5,1	5,5				
15,6	63,5	63,1	67,6	72,4	79,1	78,7	84,9				
16	—	68,0	73,0	73,1	—	84,8	91,5				
16,8	—	72,9	78,3	83,7	—	90,9	98,1				
18	—	79,1	84,3	90,8	—	98,6	106,4				
19,5	79,5	—	—	—	99,1	—	—				
22	—	89,1	95,8	102,5	—	111,3	120,1				
25	99,5	101,4	109,1	116,5	124,1	126,6	136,6				
26,3	—	106,9	114,3	122,7	—	133,2	143,8				
28	111,5	113,9	122,3	130,7	—	141,9	153,1				
30	119,5	122,1	131,5	140,1	149,1	152,1	164,1				
32	—	129,9	139,3	149,5	—	162,3	175,1				
35	139,5	142,6	153,1	163,6	—	—	—				

Продолжение табл. П1-2

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10				
15,6	92,7	100,5	108,3	123,9	139,5	155,1				
16	95,1	—	—	127,1	—	—				
16,8	99,9	108,3	116,7	133,5	—	—				
18	107,1	116,1	125,1	143,1	—	—				

Продолжение табл. П1-2

Большая сторона сечения, мм	Меньшая сторона сечения, мм									
	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10				
19,5	116,1	126,9	135,6	155,1	—	—				
20	119,1	—	—	159,1	—	—				
22	131,1	142,1	153,1	—	—	—				
25	149,1	161,6	174,1	—	—	—				
26,3	156,9	170,1	183,2	—	—	—				
28	167,1	181,1	195,1	—	—	—				
30	—	—	—	—	—	—				
32	—	—	—	—	—	—				
35	—	—	—	—	—	—				

Примечания:

1. Расчетные сечения даны с учетом закругления углов.
2. В скобки поставлены размеры лент.

Таблица П1-3

Максимальная двусторонняя толщина изоляции проводов прямоугольного сечения

Марка провода	Меньшая сторона сечения <i>a</i> голой проволоки, мм		
	0,90—1,95	2,0—3,8	4,0—5,5
ПСД	0,27	0,33	0,40
ПДА	0,35	0,35	0,40

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П2-1

Таблицы и кривые намагничивания

Значения напряженности магнитного поля в электротехнической листовой стали марок Э42 и Э43, а/см

В, эс	Меньшая сторона сечения, мм									
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
5000	0,85	0,87	0,89	0,91	0,94	0,98	1,00	1,01	1,05	1,09
6000	1,10	1,15	1,18	1,21	1,25	1,27	1,30	1,34	1,37	1,40
7000	1,45	1,50	1,53	1,56	1,60	1,65	1,70	1,73	1,78	1,80

<i>B</i> , зс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
8000	1,85	1,90	1,94	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30
9000	2,35	2,41	2,50	2,54	2,60	2,70	2,77	2,80	2,90	2,96
10 000	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,48	3,54	3,65	3,75	3,85
11 000	3,95	4,09	4,20	4,34	4,45	4,60	4,75	4,09	5,04	5,15
12 000	5,40	5,56	5,75	5,95	6,15	6,40	6,65	6,90	7,10	7,40
13 000	7,70	8,10	8,40	8,80	9,20	9,70	10,2	10,8	11,5	12,1
14 000	13,0	13,8	14,7	15,8	16,8	18,3	20,2	21,5	23,5	24,6
15 000	27,5	30,0	32,0	34,0	36,0	38,5	41,0	43,5	46,0	48,5
16 000	51,5	55,5	58,5	62,0	66,0	69,5	73,5	77,0	81,0	85,5
17 000	89	94,0	100	105	110	116	122	127	133	140
18 000	147	154	161	170	180	189	200	210	220	230
19 000	245	260	275	295	320	345	375	410	445	500
20 000	540	610	690	770	840	925	1000	1080	1160	1240
21 000	1320	1400	1480	1560	1640	1720	1800	1880	1960	2040
22 000	2120	2200	2280	2380	2400	2520	2600	2680	2760	2840
23 000	2920-3000	3080	3160	3240	3320	3400	3480	3560	3640	3640
24 000	3720	3800	3880	3960	4040	4120	4200	4280	4360	4440
25 000	4520	4600	4680	4760	4040	4920	5000	5080	5150	5240

Таблица П2-2

Значения напряженности электромагнитного поля в листовой стали толщиной $\delta = 1,75$ мм (для полюсов), а/с/м

<i>B</i> , зс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
5000	2,5	—	—	—	—	2,75	—	—	—	—
6000	2,95	—	—	—	—	3,2	—	—	—	—
7000	3,45	—	—	—	—	3,75	—	—	—	—
8000	4,05	—	—	—	—	4,4	—	—	—	—
9000	4,8	4,9	4,95	5,05	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
10 000	5,7	5,82	5,95	6,07	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
11 000	6,9	7,03	7,2	7,31	7,48	7,6	7,75	7,9	8,08	8,25
12 000	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,15	10,45
13 000	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13	13,5	13,93	14,5
14 000	14,9	15,3	15,95	16,45	17	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
15 000	22,7	24,5	25,6	27,1	28,8	30,5	32	34	36,5	37,5
16 000	40	42,5	45	47,5	50	52,5	55,8	59,5	62,3	66
17 000	70,5	75,3	79,5	84	88,5	93,2	98	103	108	114
18 000	119	124	130	135	141	148	156	162	170	178
19 000	188	197	207	215	226	235	245	256	265	275
20 000	290	302	315	328	342	361	380	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Средняя длина полувитка l_{cp} и вылет лобовой части $f_{л}$ двухслойной обмотки статора гидрогенераторов (рис. П3-1)

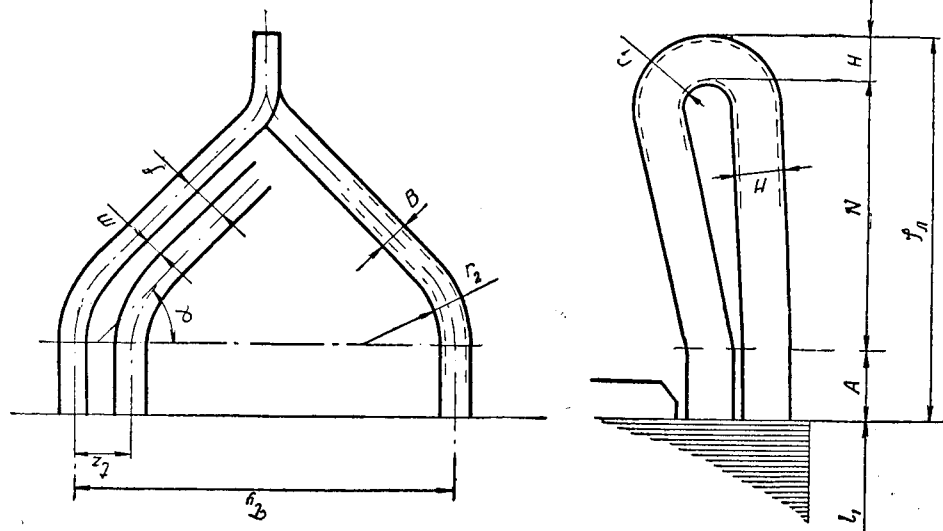


Рис. П3-1 Лобовая часть двухслойной обмотки

Расстояние между ссыями лобовых частей соседних катушек (стержней)

$$f_l \approx b_{п} + m,$$

где m — расстояние между лобовыми частями соседних катушек (стержней) по табл. П3-1.

Синус угла отгиба лобовой части

$$\sin \alpha = \frac{f}{l_z}$$

Средняя ширина лобовой части

$$\tau_y = \frac{\pi(D + h_{\text{п}})}{z} y_{\text{к ср}},$$

где $y_{\text{к ср}}$ — средний шаг обмотки, выраженный в зубцовых делениях.
Для петлевой обмотки

$$y_{\text{к ср}} = y_{\text{к}},$$

где $y_{\text{к}}$ — укороченный шаг обмотки (ширина катушки).
Для волновой обмотки

$$y_{\text{к ср}} = \tau = 3q.$$

Расчетная ширина лобовой части для петлевой обмотки и для стороны укороченных шагов волновой обмотки

$$\tau_{y1} = \frac{\pi \left(D + \frac{h_{\text{п}}}{2} \right)}{z} y_{\text{к}}.$$

Для стороны удлиненных шагов волновой обмотки

$$\tau_{y2} = \frac{\pi \left(D + \frac{h_{\text{п}}}{2} \right)}{z} (2\tau - y_{\text{к}}),$$

где $\tau = 3q$ — полное деление в зубцовых делениях.
Высота стержня (катушечной стороны) без корпусной изоляции (рис. 3-1)

$$H \approx \frac{h_1}{2} - \delta_{\text{п}} \approx \frac{u_{\text{п}}}{2} h_0.$$

Ширина стержня без корпусной изоляции

$$B \approx b_{\text{п}} - 2\delta_{\text{а}}.$$

Средняя длина полувитка обмотки статора

$$l_{\text{ср}} = l_1 + 2A + k_1 c + k_2 r_3 + \pi \left(r_1 + \frac{rH}{2} \right),$$

где

$$c \approx \tau y - r_1 - \frac{H}{2};$$

$$r_3 = r_2 + \frac{B}{2}.$$

Длина прямолинейного участка лобовой части A и радиусы закругления r_1 и r_2 выбирают по табл. ПЗ-1.

Тригонометрические коэффициенты k_1 и k_2 определяют в функции от $\sin \alpha = \frac{f}{l_2}$ по табл. ПЗ-2.

Вылет лобовой части

$$l_{\text{л}} = A + N + H,$$

где

$$N = k_1 [0,5\tau_{y1} \sin \alpha + (1 - \sin \alpha) r_3].$$

Для волновой обмотки вылет определяют как для стороны укороченных, так и для стороны удлиненных шагов.

Таблица ПЗ-1

Линейное напряжение, кв	Размеры, мм			
	m	r ₁	r ₂	A
3,15	4	12	25	40—50
6,3	5—6	15	50	55—65
10,5	8—10	15—20	50	70—75
13,8 и выше	12	20—25	50	75—85

Таблица ПЗ-2

Определение длины витка и вылета статорной двухслойной обмотки катушечного типа

α , град	$\sin \alpha = \frac{f}{l_2}$	$k_1 = \frac{1}{\cos \alpha}$	k_2	α , град	$\sin \alpha = \frac{f}{l_2}$	$k_1 = \frac{1}{\cos \alpha}$	k_2
25	0,42	1,1	1,00	40	0,64	1,31	0,82
27	0,45	1,12	0,98	41	0,66	1,33	0,805
30	0,50	1,15	0,95	42	0,67	1,35	0,79
31	0,52	1,17	0,93	43	0,68	1,37	0,78
32	0,53	1,18	0,92	44	0,695	1,39	0,76
33	0,54	1,19	0,91	45	0,71	1,42	0,75
34	0,56	1,21	0,90	47	0,73	1,47	0,72
35	0,57	1,22	0,89	48	0,74	1,50	0,71
36	0,59	1,24	0,875	50	0,77	1,56	0,68
37	0,60	1,25	0,86	52	0,79	1,63	0,65
38	0,62	1,27	0,84	53	0,80	1,66	0,63
39	0,63	1,29	0,83	55	0,82	1,74	0,60

Системы единиц измерения

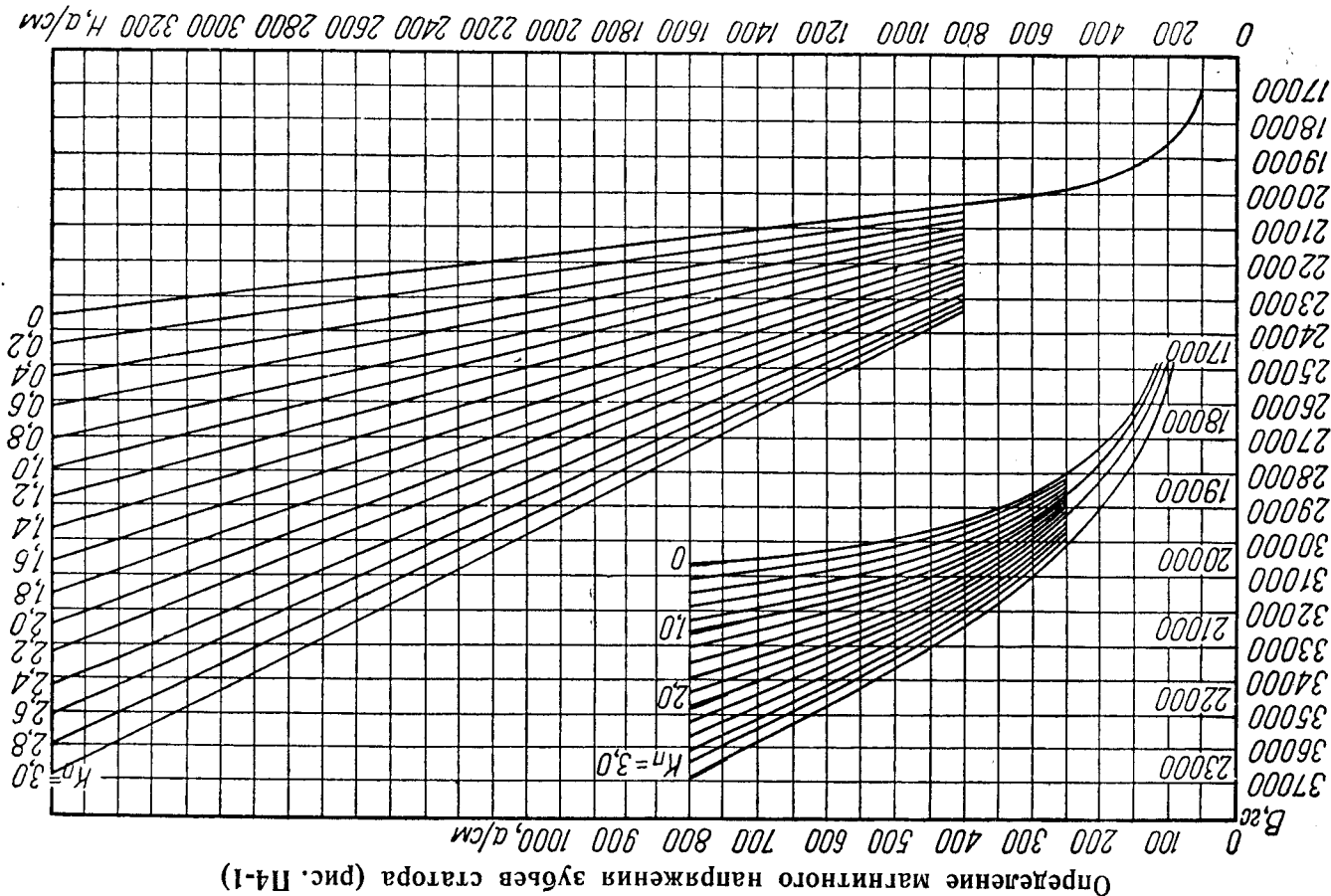
Таблица П5-1
Перевод единиц Международной системы СИ в практическую систему

Величины	Международная система единиц СИ (ГОСТ 9867-61)		Количество единиц практической системы, содержащихся в единице Международной системы СИ
	название	обозначение	
Длина	метр	м	100 см
Масса	килограмм	кг	1 кг
Время	секунда	сек	1 сек
Ток, намагничивающая сила	ампер	а	1 а
Энергия, работа	джоуль	дж	1 дж
Сила	ньютон	н	0,102 кг
Давление	ньютон на квадратный метр	н/м ²	1,02 · 10 ⁻⁵ кг/см ²
Мощность	ватт	вт	1 вт
Напряжение, э. д. с.	вольт	в	1 в
Электрическое сопротивление	ом	ом	1 ом
Полная мощность	вольт-ампер	ва	1 ва
Реактивная мощность	вар	вар	1 вар
Магнитный поток	вебер	вб	10 ⁸ максвелл
Магнитная индукция	тесла, вебер на квадратный метр	тл	10 ⁴ гаусс
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	а/м	0,01 а/см
Индуктивность	генри	гн	1 гн
Плотность тока	ампер на квадратный метр	а/м ²	10 ⁻⁴ а/см ² (или 10 ⁻⁶ а/мм ²)

Таблица П5-2
Перевод единиц практической системы в Международную систему СИ

Величины	Практическая система	Количество единиц Международной системы СИ в практической системе
Сила	килограмм	9,8 н
Давление	килограмм на квадратный сантиметр	0,98 · 10 ⁵ н/м ²
Магнитный поток	максвелл	10 ⁻⁸ вб
Магнитная индукция	гаусс	10 ⁻⁴ тл
Напряженность магнитного поля	ампер на сантиметр	100 а/м
Плотность тока	ампер на квадратный сантиметр	10 ⁴ а/м ²

Рис. П4-1. Кривые намагничивания стали Э42 и Э43 с учетом вытеснения магнитного поля в паз



ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Определение магнитного напряжения зубьев статора (рис. П4-1)

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

ных гидрогенераторов

Таблица Пб-1

Гидрогенераторы	лнения, %				Т _в , сек	Исполнение	На-грузка на пяту, Т	GD ₂ , Т·ж ²	Вес, Т	
	x ₂	x ₀	r _a	r _b					ротор с в-лом	общий
39,8	4,6	0,900	0,120	2,58	Зонтичный	100	100	30	62,5	
40,7	6,9	0,560	0,086	4,13	Подвесной	135	350	49	98,5	
35,2	8,5	0,340	0,05	6,63	Подвесной	—	450	68	140	
40,3	7,8	0,485	0,0716	4,45	Зонтичный	—	5300	168	350	
50,0	10,8	0,537	0,08	4,70	Подвесной	297	1270	90	192	
50,3	12,7	0,508	0,0775	5,8	Подвесной	390	1575	114	235	
24,5	6,93	0,381	0,062	5,33	Зонтичный	390	4000	160	315	
33,9	7,95	0,518	0,0639	3,97	Подвесной	1130	13310	300	536	
42,0	7,9	0,264	0,0460	7,83	Подвесной	378	520	98	214	
39,0	9,3	0,433	0,048	5,65	Зонтичный	2100	50000	565	1142	
40,7	12,1	0,353	0,0432	7,09	Подвесной	960	28000	425	825	
—	—	—	—	—	Подвесной	200	615	175	415	
—	—	—	—	—	Подвесной	440	750	165	350	
—	—	—	—	—	Зонтичный	1600	50000	685	1400	
—	—	—	—	—	Зонтичный	1500	68000	770	1500	
—	—	—	—	—	Зонтичный	3400	100000	765	1410	
—	—	—	—	—	Зонтичный	2800	84000	595	1170	

Таблица Пб-2

стей гидрогенераторов

Г	Размеры ротора										Размеры демферной обмотки				
	2l _{ср} , см	δ, см	b _р , см	h _р , см	h _п , см	h _т , см	ω _в	b ₀ × a ₀ , мм	2l _в , см	l _с	S _к , см ²	l _с , см	b _ш × h _ш , см		
—	—	1,3	33,6	4,45	24,8	28	—	47 × 2,83	—	—	—	—	—		
—	—	1,1	28	3,5	21	23	—	40 × 6	—	—	—	—	—		
—	—	1,4	39	7,85	27,5	22,5	—	60 × 5,5	—	—	—	—	—		
—	—	1,5	47	5,0	31,0	27	—	47 × 5,1	—	—	—	—	—		
—	—	1,0	26	3,5	18,5	21	—	55 × 6	—	—	—	—	—		
505	—	1,2	29,5	4,6	20	21	—	21,5 × 46 × 7,1	360	6	1,87,6	142	0,3/0,3		
—	—	1,2	22,6	3,3	17	20,5	—	55 × 9,52	—	—	—	—	—		
—	—	2,2	50	7,0	35	28	—	69 × 4,1	—	—	—	—	—		
426	—	1,4	31	4,5	25	27	—	17,5 × 40 × 10	340	5	1,8,6,4	125	0,3/0,3		
664	—	2,0	55	6,0	40	25	—	34,5 × 60 × 5,5	540	—	—	—	—		
550	—	2,0	31	5,0	23,5	29	—	17,5 × 44 × 12,5	418	5	2,0,9,4	156	0,3/0,3		
—	—	1,9	33,6	4,45	24,8	28	—	66,5 × 9,65	—	—	—	—	—		
598	—	1,8	34,5	5,0	27,0	30	—	19,5 × 54 × 11	515	5	2,2,9,5	192	0,3/0,3		

Технические данные вертикаль-

Параметры и вес

S _н , тыс. кв	U _н , кв	cos φ _н	v _н , %	n _н , пуг/об.мин	Сопротив-					
					x _σ	x _d	x _q	x' _d	x' _q	x'' _d
4,0	6,6	0,8	94,6	214/455	13,2	91	55,5	28,7	—	—
10,0	6,6	0,8	96,0	250/430	11,2	102	60,4	27,0	—	—
15,0	6,6	0,7	95,0	300/540	9,0	95,7	52,2	23,7	—	—
18,0	10,5	0,8	95,7	100/275	14,6	99,8	57,9	28,0	—	—
18,7	10,5	0,8	—	187,5/—	15,0	105,2	69,0	36,2	—	—
25,0	10,5	0,6	95,1	187,5/380	13,8	131,9	75,9	33,3	—	—
27,0	10,5	0,8	96,9	150/320	13,0	98,6	59,0	27,8	—	—
30,0	11,0	0,8	96,3	75/212	11,3	72,3	45,3	25,3	—	—
33,0	11,0	0,7	96,0	375/100	10,7	102	61,8	28,5	—	—
68,75	13,8	0,8	97,3	62,5/165	12,3	73,0	55,4	27,4	—	—
77,5	13,8	0,8	97,8	88,2/176	12,9	87,5	55,6	29,7	—	—
80	10,5	0,8	97,8	500/920	—	123	—	34	22	—
68,75	10,5	0,8	97,5	428,6/700	—	114	—	28	18	—
235	15,75	0,8	98,3	125/225	—	92	—	35	21	—
180	15,75	0,8	97,0	93,6/190	—	73	—	29	19	—
123,5	13,8	0,8	97,3	68,2/140	—	51	—	19	14	—
117,65	13,8	0,8	97,2	62,5/125	—	65	—	29	21	—

Размеры активных ча

S _н , Мва	n _н , об/мин	U _{нл} , кв	cos φ _н	I _{нл} , а	Размеры статора				
					D _а , см	D, см	l _н , см	z	b _ш /h _ш	u_{ш}/a	(b_{0} × a_{0}) × c_{0}, мм
10	250/430	6,6	0,8	340	425/375	60/270	1,95/11	8/3	(5,9 × 2,1) 8
15,6	150/400	6,3	0,8	585	546/500	90/288	2,1/12	2/2	(6,4 × 2,63) 30
15	300/540	6,6	0,7	595	425/370	105/180	2,8/11	2/1	—
16,5	500/925	11,5	0,7	520	325/265	130/144	2,4/11	—/1	—
18	100/275	10,5	0,8	585	800/752	750/396	2,6/13,5	6/2	(4,7 × 2,44) 18
25	150/—	10,5	0,8	810	576/514,5	125/336	2,15/15	2/1	(5,1 × 2,44) 36
30	75/212	11,0	0,8	850	894/854	165/504	2,65/11	6/4	(4,82 × 2,16) 14
33	375/700	11	0,7	535	425/355	133/189	2,6/16	2/1	(7,4 × 2,44) 44
40	100/—	10,5	0,8	1160	854/797	120/396	2,55/14,1	6/4	(6,9 × 2,44) 12
66	375/—	10,5	0,85	890	465/390	210/180	2,6/14,9	2/2	(7,4 × 2,63) 36
71,5	62,5/—	13,8	0,8	1300	1340/729	150/684	2,64/12,8	2/2	(6,9 × 2,44) 30
77,5	88,2/176	13,8	0,8	1140	1098/1044	145/600	2,54/14,6	4/4	(4,44 × 2,28) 32
104	83,3/—	13,8	0,8	1270	1160/1100	180/486	2,75/17	2/2	(7,4 × 2,63) 42

Таблица 6-1
Расчет характеристик намагничивания и холостого хода

Величины	Числовые значения k_E				
	0,5	1,0	1,08	1,2	1,3
$E_B = \Phi, \text{ д.е.}$	0,5	1,0	1,08	1,2	1,3
$E_B = E_B U_{\text{нф}} = E_B 6060, \text{ в}$	3030	6060	6550	7280	7880
$\Phi = 3,96 \cdot 10^3 E_B, \text{ мкс} \cdot 10^7$	1,20	2,40	2,59	2,88	3,12
$B_6 = 3,25 \cdot 10^{-4} \Phi, \text{ гс}$	3900	7800	8420	9360	10300
$B_z = 2,23 B_6, \text{ гс}$	8700	17400	18750	20900	23000
$B_a = 5,32 \cdot 10^{-4} \Phi, \text{ гс}$	6380	12800	13800	15300	16600
$B_{z2} = 1,55 B_6, \text{ гс}$	6050	12100	13050	14500	16000
$H_{z1}, \text{ а/см}$	2,2	110	180	575	1300
$H_a, \text{ а/см}$	1,25	7,10	11,5	34,0	73,5
$H_{z2}, \text{ а/см}$	3,0	8,6	11,0	17,5	40
$F_{\delta 12} = 1,55 B_6, \text{ а}$	6050	12100	13050	14500	16000
$F_z = 15 H_{z1}, \text{ а}$	33	1650	2700	8620	19500
$F_a = 22,7 H_a, \text{ а}$	18	800	110	280	500
$F_{z2} = 1,9 H_{z2}, \text{ а}$	6	17	21	33	76
$F_{11}, \text{ а}$	6107	13847	15881	23433	36076
$\Phi_{\sigma} = 642 F_{11}, \text{ мкс} \cdot 10^7$	0,382	0,89	1,02	1,50	2,32
$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma}, \text{ мкс} \cdot 10^7$	1,58	3,29	3,61	4,38	5,44
$B_m = 4,39 \cdot 10^{-4} \Phi_m, \text{ гс}$	6930	14450	15850	19200	23900
$H_m, \text{ а/см}$	3,40	17,5	37	207	—
$F_m = 27,7 H_m, \text{ а}$	95	485	1030	5730	2
$F_{\delta m}, \text{ а}$	110	515	610	845	2
$F_2 = F_m + F_{\delta m}$	205	1000	1640	6575	—
$F_B = F_1 + F_2$	6312	14847	17521	30008	—
$F_B = \frac{F_B}{F_{Bx}}$	0,425	1,0	1,18	2,01	—

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Петров. Электрические машины, ч. II. Госэнергоиздат, 1963.
2. М. И. Зунделевич. Технология производства крупных гидророторов. ГЭИ, 1961.
3. М. П. Костенко, Л. М. Пигорский. Электрические машины, ч. II. Госэнергоиздат, 1958.
4. М. П. Костенко. Электрические машины, часть специальная. Госэнергоиздат, 1949.
5. А. Е. Алексеев. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат, 1958.
6. Н. В. Виноградов, Ф. А. Горюнов, П. С. Сергеев. Проектирование электрических машин. Под ред. П. С. Сергеева. Госэнергоиздат, 1956.
7. Н. В. Виноградов. Производство электрических машин. Госэнергоиздат, 1961.
8. Б. Н. Кравоский. Вопросы прочности электрических машин. Изд. Академии наук СССР, 1951.
9. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Гостехиздат УССР, 1960.
10. В. И. Калитвинский. Изоляция электрических машин. Госэнергоиздат, 1949.
11. В. Т. Касьянов. Составление схем петлевых и волновых обмоток трехфазного тока. Сб. «Электросила», 1949, № 6.
12. В. Т. Касьянов. Составление некоторых специальных схем трехфазных обмоток. Сб. «Электросила», 1951, № 8.
13. П. М. Ипатов. Практический способ составления схем трехфазных волновых обмоток с дробным числом пазов на полюси фазу. Сб. «Электросила», 1954, № 12.
14. В. В. Титов. Гидрогенераторостроение. ОГИЗ, 1939.
15. В. И. Сыроев. Расчет синхронных машин. ОГИЗ, 1940.
16. И. А. Сыромятников. Режим работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.
17. В. Т. Касьянов. Расчет явнополюсных синхронных машин. Изд. ВМАКВ им. А. Н. Крылова, 1951.
18. М. П. Костенко и Б. Е. Коники. Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины. «Электричество», 1951, № 3.

19. К. Ф. Костин. Вертикальные гидрогенераторы для сельских ГЭС. Госэнергоиздат, 1955.
20. К. Ф. Костин, М. Н. Грузов. Подпятник на гидравлической опоре для мощных гидрогенераторов. «ВЭП», 1955, № 4.
21. П. М. Ипатов. Построение рациональных схем волновых обмоток статора СГ с дробным числом пазов на полюс и фазу. Сб. «Электросила», 1959, № 17.
22. А. И. Молдавер. Составление схем трехфазных двухслойных волновых обмоток. «ВЭП», 1959, № 2.
23. В. И. Зимин и др. Обмотки электрических машин. ГЭИ, 1961.
24. В. В. Домбровский и Г. Б. Пинский. Расчетные материалы к выбору основных размеров и определению параметров гидрогенераторов. Сб. «Электросила», № 19.
25. Электротехнический справочник. т. 1, ГЭИ, 1962.
26. П. М. Ипатов. Влияние демпферной клетки на э. д. с. синхронного генератора. «Электричество», 1957, № 3.
27. П. М. Ипатов. Добавочные потери в активной стали статора от пульсаций магнитного потока, вызванных демпферной обмоткой. «ВЭП», 1959, № 2.
28. П. М. Ипатов, Г. А. Сипайлов. Упрощенный тепловой и вентиляционный расчет гидрогенераторов. «ВЭП», 1957, № 6.
29. М. И. Земляной, А. А. Миная и др. Вентиляционные и тепловые исследования гидрогенератора типа СВ $\frac{1500}{200}$ — 58 Куйбышевской ГЭС. Сб. «Электросила», 1959, № 16.
30. В. А. Веников. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. ГЭИ, 1958.
31. Н. П. Иванов, А. С. Еремеев и др. Мощные гидрогенераторы. Сб. «Электросила», 1956, № 14.
32. А. С. Еремеев. Конструкция гидрогенераторов. Сб. «Электросила», 1956, № 14.
33. М. Я. Каплан. Подпятники гидрогенераторов. Сб. «Электросила», 1956, № 14.
34. М. И. Зунделевич, С. С. Тимофеев. Новая технология изготовления гидрогенераторов. Сб. «Электросила», 1956, № 14.
35. А. А. Сорочкин. Исследование стержня обмотки статора с водяным охлаждением. Сб. «Электросила», 1959, № 17.
36. А. С. Еремеев. Перспективы повышения мощности гидрогенераторов. «ВЭП», 1959, № 11.
37. В. В. Домбровский, А. С. Еремеев, М. Я. Каплан. Перспективы повышения мощностей гидрогенераторов. Сб. «Электросила», 1961, № 20.
38. В. В. Домбровский и М. Я. Каплан. Проектирование гидрогенераторов большой мощности. «ВЭП», 1962, № 4.
39. А. Б. Шапиро. О жидкостном охлаждении турбогенераторов. «ВЭП», 1959, № 3.
40. Д. И. Заславский. Графики для определения производительности воздухоохладителей. Сб. «Электросила», № 19.
41. Э. В. Школьник, Г. Б. Пинский. Сегментировка сердечников статоров синхронных машин. «ВЭП», 1961, № 8.
42. Н. П. Иванов. Вопросы проектирования мощных гидрогенераторов. «ВЭП», 1961, № 6.
43. А. С. Еремеев. Перспективы повышения мощности гидрогенераторов. «ВЭП», 1959, № 11.
44. П. М. Ипатов, Г. М. Хуторский. Номинальное напряжение генераторов большой мощности. «ВЭП», 1960, № 8.
45. К. Ф. Костин. Подпятники для мощных гидрогенераторов. «ВЭП», 1959, № 7.
46. К. Ф. Костин. Развитие гидрогенераторостроения на заводе «Уралэлектростроитель». «Электричество», 1959, № 7.
47. К. Ф. Костин. Гидрогенераторостроение на заводе «Уралэлектростроитель». «ВЭП», 1963, № 2.
48. П. М. Ипатов, М. Я. Каплан. Вопросы проектирования гидрогенераторов для Братской ГЭС. Сб. «Электросила», № 16.
49. А. А. Песоцкий. Водяное охлаждение обмоток статоров турбогенераторов. Достижения в электромашиностроении и аппаратостроении. ЦБТИ, 1959.
50. Охлаждение турбо- и гидрогенераторов. Материалы научно-технической конференции. ЦИНТИ ЭП, 1959.
51. М. Я. Каплан и др. Гидрогенераторы Братской ГЭС. Сб. «Электросила», 1962, № 21.

Выбор главных размеров активных частей гидрогенератора

§ 2-1. Основные требования, предъявляемые к гидрогенератору	91
Параметры гидрогенератора	92
Система возбуждения гидрогенератора	93
Форма кривой напряжения (по ГОСТу 183—55)	94
Кратковременные перегрузки по току (по ГОСТу 183—55 и 5616—50)	95
Отклонения от номинального режима работы (по ГОСТу 5616—50)	95
Конструкция гидрогенератора (по ГОСТу 183—55 и 5616—50)	95
§ 2-2. Зависимость главных размеров гидрогенератора от расчетной мощности и скорости вращения	97
Выбор основных размеров гидрогенераторов с внутренним охлаждением обмоток	102

Глава третья

Электромагнитный расчет

§ 3-1. Выбор типа обмотки и числа пазов статора	103
Выбор чисел параллельных ветвей a и эффективных проводов в пазу u_n	104
Выбор числа пазов на полюс и фазу q	105
Выбор числа сегментов сердечника статора и окончательное установление обмоточных данных и главных размеров	107
§ 3-2. Выбор размеров паза статора	110
Выбор размеров паза и проводов при водяном охлаждении обмотки статора	116
§ 3-3. Выбор зазора между статором и ротором, определение длины сердечника статора и высоты его ярма	118
§ 3-4. Выбор размеров сердечника ротора и демферной обмотки	122
Длина полюсной дуги и радиус окружности дуги полюсного накопника	123
Демферная обмотка	124
§ 3-5. Характеристики намагничивания и холостого хода	130
Последовательность расчета характеристик намагничивания и холостого хода	135
§ 3-6. Определение намагничивающей силы возбуждения при номинальной нагрузке	136
§ 3-7. Выбор размеров, тока и основных параметров обмотки возбуждения	140
Выбор размеров обмотки возбуждения при внутреннем поперечном охлаждении	145
§ 3-8. Параметры и постоянные времени	146
§ 3-9. Веса активных материалов, вес ротора, нагрузка на пятю	157
§ 3-10. Расчет потерь и коэффициента полезного действия	159

Глава четвертая

Механический расчет

§ 4-1. Расчет крепления полюсов	164
Крепление полюсов при помощи хвостов	164
Крепление полюсов при помощи болтов	167
§ 4-2. Расчет межполюсных распорок	167
§ 4-3. Расчет кромки полюсного накопника	171
§ 4-4. Расчет щеки полюса	173
Расчет напряжений в сечении $I-I$ козырька щеки	173

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

Предисловие	4
-------------	---

Глава первая

Конструкция синхронных гидрогенераторов

§ 1-1. Общие сведения	5
§ 1-2. Корпус статора	12
§ 1-3. Сердечник статора	13
§ 1-4. Обмотка статора	16
§ 1-5. Влияние угонной скорости на конструкцию ротора	21
§ 1-6. Влияние махового момента на конструкцию ротора	22
§ 1-7. Остов ротора	23
Роторы с дисковым остовом	23
Роторы со спицевым остовом	27
§ 1-8. Обод ротора	32
§ 1-9. Сердечник полюса	38
Изолирование сердечников полюсов	41
§ 1-10. Катюшки полюсов	43
§ 1-11. Вал	49
§ 1-12. Подпятник	51
§ 1-13. Направляющий подшипник	61
§ 1-14. Подшипниковые токи и способы их устранения	64
§ 1-15. Крестовины	65
§ 1-16. Система вентиляции	71
Воздухоохладители	71
Системы вентиляции гидрогенераторов	72
§ 1-17. Торозная система	76
§ 1-18. Контактные кольца	77
§ 1-19. Система возбуждения	77
Электромашинное возбуждение	77
Ионное возбуждение	78
§ 1-20. Регуляторный генератор	79
§ 1-21. Противовоздушное устройство	79
§ 1-22. Особенности устройства активных частей гидрогенераторов с внутренним охлаждением обмоток	80
Устройство обмотки статора с внутренним водяным охлаждением	82
Устройство водяного охлаждения обмотки ротора	85
Устройство внутреннего воздушного охлаждения обмотки возбуждения	87
Устройство сердечника статора в гидрогенераторах с внутренним охлаждением	88

Стр.	235
§ 6-3. Вентиляционный и тепловой расчеты (§ 5-1 и 5-2)	235
Определение расхода воздуха в вентиляционной системе гидрогенератора	235
Определение превышения температуры обмотки и сердечника статора	236
Определение превышения температуры обмотки ротора	238
Приложение 1. Данные обмоточных проводов медной проволоки и лент	239
Приложение 2. Таблицы и кривые намагничивания	243
Приложение 3. Средняя длина полувитка l_{cp} и вылет лобовой части /л двухслойной обмотки статора гидрогенераторов	245
Приложение 4. Определение магнитного напряжения зубцов статора	248
Приложение 5. Системы единиц измерения	249
Приложение 6. Технические данные вертикальных гидрогенераторов	251
Литература	252

Стр.	175
Расчет напряжений в хвосте щеки (Т-образный хвост)	175
§ 4-5. Расчет обода ротора	175
Расчет дискового обода	175
Расчет сегментного обода ротора	177
§ 4-6. Расчет махового момента ротора	179
§ 4-7. Расчет станины	180

Глава пятая

Вентиляционный и тепловой расчеты

§ 5-1. Вентиляционный расчет гидрогенератора с поверхностным охлаждением	182
§ 5-2. Тепловой расчет гидрогенератора с поверхностным охлаждением	189
Определение превышения температуры обмотки и сердечника статора	191
Определение превышения температуры обмотки возбуждения	196
§ 5-3. Тепловой расчет гидрогенератора со смешанным внутренним охлаждением	197
Тепловой и гидравлический расчеты системы охлаждения обмотки статора	197
Тепловой расчет обмотки возбуждения с поперечным внутренним охлаждением	199

Глава шестая

Пример расчета гидрогенератора

§ 6-1. Электромагнитный расчет	201
Задание на проект (§ 2-1)	201
Выбор основных размеров (§ 2-2)	201
Выбор типа обмотки и числа пазов статора (§ 3-1)	203
Выбор размеров паза статора (§ 3-2)	205
Выбор зазора между статором и ротором, определение длины сердечника статора и высоты яра	207
Выбор размеров сердечника ротора и демпферной обмотки	208
Определение ширины сердечника полюса (§ 3-4)	210
Характеристики намагничивания и холостого хода	211
Средняя длина полувитка l_{cp} и вылет лобовой части /л обмотки статора (Приложение 3)	214
Сопровождения обмотки статора (§ 3-8)	216
Намагничивающая сила обмотки возбуждения при номинальной нагрузке (§ 3-6)	217
Выбор размеров, тока и основных параметров обмотки возбуждения (§ 3-7)	219
Параметры, постоянные времени гидрогенератора	222
Вес активных материалов, вес ротора, нагрузка на подпятник (§ 3-9)	226
Потери и коэффициент полезного действия	227
§ 6-2. Механический расчет	229
Расчет крепления полюсов (§ 4-1)	229
Расчет межполюсных распорок (§ 4-2)	230
Расчет кромки полюсного наконечника (§ 4-3)	231
Расчет щеки полюса (§ 4-4)	231
Расчет обода ротора (§ 4-5)	232
Расчет махового момента ротора (§ 4-6)	235