

УДК 621.313.322-81.017.72

В.А. Старовойтов, С.Г. Филимонов

## ТУРБОГЕНЕРАТОР С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Полная электромагнитная мощность электрической машины, развиваемая обмоткой якоря, расположенной на среднем диаметре  $D_1$  и имеющей осевую «активную» длину  $l_1$  при частоте вращения  $n$  об/мин составляет:

$$S = 0,11D_1^2l_1nA_1B_1k_{ob1} = 2,215D_1l_1vA_1B_1k_{ob} \quad (1)$$

где  $A_1$  – линейная нагрузка на единицу длины окружности диаметра  $D_1$ ;  $B_1$  – основная гармоническая индукция магнитного поля на этом же диаметре;  $k_{ob1}$  – обмоточный коэффициент;  $v = \pi D_1 n / 60$  – окружная линейная скорость магнитного поля относительно проводника. На единицу объема обмотки приходится, таким образом, мощность, равная

$$s = S / \pi D_1 l_1 A_1 j_1^{-1} = 0,705 k_{ob1} B_1 j_1 v, \quad (2)$$

где  $j_1$  – плотность тока, рассчитанная на эффективное сечение обмотки. В современных крупных турбо  $j_1 = 0,3 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ ;  $B_1 = 1 \text{ Т}$ , следовательно, максимальное значение  $s = 3,8 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$ . В машинах традиционной конструкции дальнейшее увеличение значения  $B_1$  ограничено насыщением магнитопровода и потерями в обмотке возбуждения, резко возрастающими при повышении степени насыщения магнитной цепи; значения  $D_1$  и  $l_1$  – пределами прочности материалов, допустимыми амплитудами вибраций ротора и транспортными ограничениями; увеличение линейной нагрузки  $A_1$  сдерживается ограничениями, накладываемыми на индуктивные сопротивления и местные потери.

Потери в обмотке возбуждения, которая в современных турбогенераторах является наиболее нагруженной током в тепловом отношении, на единицу полной мощности якоря составляют:

$$P_f / S = 1,42 j_2 P_2 \alpha / k_{ob1} B_1 v, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – отношение линейных нагрузок статора и ротора, равное:

$$\alpha \approx 0,85(1 + k_h)k_{ob1} \times \\ \times \left\{ \left[ (\cos \varphi / x_{ad})^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + [(\sin \varphi + x_\sigma) / x_{ad} + (1 + k_h) - 1]^2 \right] \right\}^{1/2} k_{ob2}$$

Здесь  $x_{ad}$  – синхронное индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки статора и ротора,  $x_\sigma$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора,  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности,  $k_h$  – коэффициент насыщения магнитной цепи.

Ограниченные размеры ротора приводят к сильному возрастанию удельных потерь в обмотке возбуждения современных мощных турбогенераторов. Так, если удельные потери в роторе

двухполюсного турбогенератора 100 МВт принять за 100 %, то в турбогенераторе 1200 МВт. они возрастают до 850 %.

Традиционные методы непосредственного охлаждения обмоток, применяемые до сих пор, являлись весьма эффективными. Например, превышение температуры обмотки возбуждения турбогенератора 800 МВт с непосредственным водородным охлаждением составляет 30 °C, что значительно меньше допустимого.

В этой связи можно утверждать, что роторы с традиционной газовой системой непосредственного охлаждения могут обеспечить изготовление двухполюсных турбогенераторов мощностью 1600–2000 МВт [1]. В то же время непосредственное водяное охлаждение обмотки статора позволяет изготовить машины примерно такой же мощности. Однако, несомненно, что при необходимости создания турбогенераторов единичной мощностью, существенно выше рассмотренной ранее, традиционные методы могут оказаться недостаточно эффективными.

Другой проблемой, связанной с ростом мощности, является увеличение индуктивных сопротивлений рассеяния и, в частности, переходного сопротивления  $x'_d$ , величина которого существенно влияет на устойчивость параллельной работы генераторов. В требованиях к турбогенераторам указывается на нежелательность превосходить значение  $x'_d$  выше 40 %. Для наиболее мощных и использованных турбогенераторов ненасыщенное значение достигает в настоящее время 32–36 %. Характер зависимости  $x'_d$  от основных электромагнитных нагрузок при прочих постоянных параметрах

$$x_d' \sim A_1 / B_1.$$

По мере роста линейной нагрузки  $A_1$  неизбежно увеличение параметра  $x'_d$ . Таким образом, традиционное выполнение активной зоны статора и ротора с магнитными зубцами может явиться сдерживающим фактором повышения использования активных материалов.

При ограничении размеров и индукции, потери в обмотке ротора и статора растут пропорционально линейной нагрузке, и с некоторого ее значения КПД перестает расти с ростом мощности. Кроме того, увеличение плотности тока в обмотке ротора вызывает рост термомеханических напряжений при неизбежных в эксплуатации кратковременных перегрузках и рост плотности теплового потока, которая может достигнуть критического для данной системы охлаждения значения.

В связи с возникающими проблемами при

создании турбогенераторов традиционного, классического исполнения большой мощности и высокого использования достаточно остро может быть поставлен вопрос о применении искусственных методов охлаждения вплоть до использования явления сверхпроводимости в обмотках.

Помимо технических трудностей, связанных с созданием новых принципов охлаждения, следует ожидать, что новые машины будут обладать в эксплуатации еще не изученными свойствами и потребуется достаточно длительная работа, прежде чем такие машины будут признаны удовлетворяющими необходимым требованиям.

Попытки реализации криотурбогенераторов (КТГ) со сверхпроводящим термостатированным ротором не увенчались успехом. Однако в любых вариантах конструкций неподвижная обмотка якоря, располагаемая на статоре, представлялась «теплой».

Неудачи с фронтальной атакой на сверхпроводящий КТГ (4–21 К) никоим образом не исключали возможности изучения проблемы на более высоких температурных уровнях, при которых используется не сложное оборудование криогенной техники, а широкораспространенные компрессионные машины умеренного охлаждения, например, фреоновые (хладоновые).

В качестве объекта исследования использовался серийный трехфазный синхронный турбогенератор ТК-3-2 со смешанной системой охлаждения: охлаждение ротора и стали статора – воздушное, а охлаждение обмотки статора – водяное. Его техническая характеристика:  $S_u = 3750$  кВА;  $\varphi = 0,8$ ;  $n_u = 3000$  об/мин;  $U_u = 400$  В.

Машина прошла испытания в соответствии с требованиями, предъявляемыми стандартами.

Выбор в качестве базового современного серийного турбогенератора, его размеров и мощности выполнялся с учетом необходимости оценки специфики электромашинных процессов низкотемпературного охлаждения. В таком турбогенераторе сочетается стабильный, проверенный практикой электромашиностроения, метод генерирования электроэнергии с новым методом низкотемпературного охлаждения с помощью холодильной машины. Для обмоток с тепловыделениями выбор способа низкотемпературного охлаждения представляет самостоятельную задачу. Для низкотемпературного охлаждения с применением эффективных паровых компрессорных холодильных машин использование испарительных процессов целесообразно как с целью интенсификации теплообмена, так и улучшении его термодинамических характеристик.

В качестве хладагента в рассматриваемом турбогенераторе, называемым далее низкотемпературным с индексом ТК-3ф, использовался жидкий хладон-12 (*R*12), имеющий нормальную температуру кипения  $t_s = -30$  °С.

Выбор хладонового охлаждения связан с воз-

можностями использования в НТГ обычных проводниковых и конструкционных материалов, существующей технологической базы и стандартных средств холодильной техники.

В экспериментальном НТГ ТК-3ф сохранены основные узлы ТГ ТК-3-2. Изменены лишь отдельные элементы, конструкция которых определяется спецификой испарительного охлаждения.

*Охлаждение обмотки ротора.* Не изменилась и радиальная схема движения хладоносителя по каналам обмотки возбуждения. Однако, если в базовом ТК-3-2 воздух в них нагнетался осевыми вентиляторами, то в экспериментальном ТК-3ф использован эффект насосного действия ротора. В соответствии с ним вместо вентиляторов установлены круговые коллекторы с форсунками. Жидкий хладон поступает из неподвижных форсунок под козырек, укрепленный на торце ротора. Центробежной силой жидкость отжимается к периферии, откуда поступает в подпазовый канал, а избыток отделившегося пара выходит в объем корпуса генератора. Из подпазового канала жидкость распределяется по радиальным каналам обмотки ротора, где она кипит за счет подвода тепла от обмотки. Парожидкостная смесь выбирается из радиальных каналов к зазору между ротором и статором, откуда направляется в паровое пространство корпуса турбогенератора.

*Охлаждение стали статора (магнитопровода).* Испарительное охлаждение магнитопровода осуществляется путем подачи жидкого хладона в кольцевые коллекторы, расположенные над вентиляционными каналами пакетов стали (тех же размеров, что и в базовом СТГ ТК-3-2). Во внутренних стенках коллекторов насыпаны калибранные отверстия, через которые хладон дросселируется в полость каналов, где кипит за счет тепловыделений, а пар через зазор между ротором и статором поступает в паровое пространство генератора. По условиям изготовления корпус турбогенератора ТК-3-2 выполнен из листовой стали с небольшой толщиной листа, что привело к необходимости ограничить рабочие давления величиной  $3 \cdot 10^5$  Па.

*Охлаждение статорной обмотки.* Однослойная обмотка статора состоит из 36 стержней, каждый из которых набран из 12 стандартных медных проводников сечением  $7,4 \times 5,0$  мм и каналами  $4,4 \times 2,0$  мм. Обмотка делится на шесть фазных зон, гальванически соединенных между собой попарно последовательно. В гидравлической цепи обмотки при необходимости убирался сливной коллектор, а коммутация гидравлических цепей производилась с помощью тефлоновых конечников.

Жидкий хладон поступает по полому токовводу к наконечникам стержней и далее в параллельные каналы полых проводников, где кипит под действием джоулевых тепловыделений. Из стержней парожидкостная смесь поступает в объ-

ем корпуса турбогенератора, где происходит отделение жидкости от пара.

Герметизация неподвижных чистой генератора осуществлялась с помощью резиновых и фторопластовых прокладок. Концы вращающегося вала турбогенератора выведены из корпуса с помощью герметичных металлографитовых торцевых уплотнений с раздельной системой смазки маслом ХФ-12Г.

При разработке и создании стенда для испытания принципиально нового типа низкотемпературного турбогенератора в условиях лаборатории ставились задачи, связанные с воспроизведением

основных особенностей работы агрегата турбогенератор – холодильная машина и получением основных теплотехнических характеристик такого агрегата. Основными признаками системы охлаждения любого низкотемпературного генератора является наличие холодильной машины с замкнутым контуром циркуляции хладоносителя, обеспечивающим отвод и поддержание на заданном уровне температур его рабочих элементов.

Целью проведения настоящих экспериментальных исследований являлось получение количественной информации о температурных полях обмоток в номинальных и перегрузочных режи-

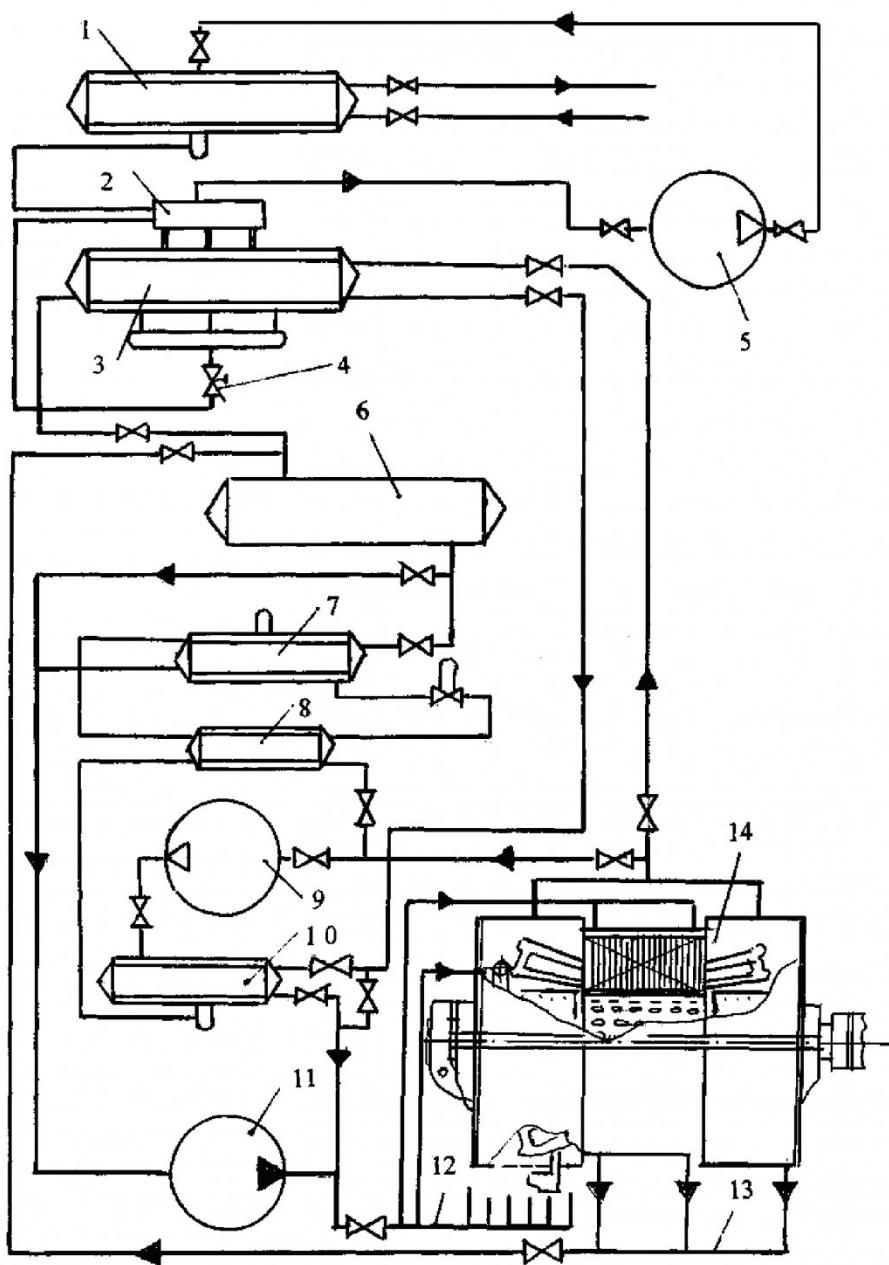


Рис. 1. Схема низкотемпературного турбогенератора: 1 – конденсатор XM22ФУ300; 2, 8 – регенеративный теплообменник; 3 – испаритель-конденсатор XM22ФУ300; 4 – клапан регулирующий; 5 – компрессор 22ФУ300; 6 – накопитель жидкого хладона; 7 – переохладитель; 9 – компрессор АК22ФУ-40; 10 – конденсатор XM2ФУ-40; 11 – герметичный насос ЦНГ-63; 12 – коллектор раздаточной станции; 13 – коллектор сливной; 14 – турбогенератор ТК-3Ф

максимальной работы. НТГ ТК-3ф, о теплотехнических и энергетических характеристиках системы испарительного низкотемпературного охлаждения, а также определение принципов построения систем низкотемпературного охлаждения. В соответствии с этим создан стенд (рис. 1), основными элементами которого являются турбогенератор с отдельно установленной холодильной машиной и насосный контур циркуляции хладона-12. Насосно-циркуляционный контур обеспечивает работу системы низкотемпературного испарительного охлаждения экспериментального НТГ ТК-3ф. Контур поршневой хладоновой холодильной машины предназначен для отвода выделяющихся в НТГ ТК-3ф потерь на уровень температуры окружающей среды.

Охлаждение активных элементов НТГ ТК-3ф производилось как по одноконтурной, так и по двухконтурной схемам. В контуре циркуляции переохлажденный жидкий хладон-12 подается герметичным насосом на регулирующую станцию, откуда распределяется в коллекторы статора, ротора и магнитопроводов. Образовавшаяся при кипении хладона-12 парожидкостная смесь разделяется в паровом пространстве корпуса НТГ, из нижней части которого жидкость сливаются в накопитель, а пар из верхней части поступает в конденсатор-испаритель холодильной машины, конденсируется и сливается в накопитель. Из накопителя жидкость, поступает в переохладитель, обслуживаемый вспомогательной холодильной машиной, а затем направляется в насос. При работе по двухконтурной схеме в контуре холодильной машины циркулировал хладон-22, а в насосном контуре – хладон-12. В испытаниях по одноконтурной схеме пары хладона-12 направлялись по обводной трубе во всасывающую линию компрессора, а жидкий хладон из испарителя сливался в накопитель.

Испытания низкотемпературного турбогенератора ТК-3ф проводились с помощью метода косвенных нагрузок. При испытаниях низкотемпературного агрегата этот метод не обеспечивает получение характеристик всех элементов агрегата. Поэтому он дополнен независимым методом тепловых балансов, что обеспечивает получение надежных экспериментальных данных.

Стенд включает в себя ряд систем, блоков и контуров, которые обеспечивают проведение экспериментальных исследований.

**Насосно-циркуляционный контур** обеспечивает отвод тепла из объема НТГ ТК-3ф и передачу его в контур холодильной машины. Предварительные исследования необратимых потерь в контуре циркуляции показали, что наименьшие потери достигаются при создании изотермических полей обмоток НТГ, что требует снижения гидравлических сопротивлений тракта обмоток и вынужденного движения кипящего потока хладона. Это определяет необходимость

применения испарительного охлаждения в сочетании с насосным контуром циркуляции. Герметичный хладоновый насос 11 (рис. 1) типа ЦНГ-63, установленный в нижней точке схемы, подает жидкий хладон к коллектору 12 распределительно-регулирующей станции. Из коллектора хладон распределялся с помощью регулирующих клапанов в линии охлаждения обмоток стали НТГТК-3ф. В обмотку статора жидкий хладон подавался через токовводы по шести раздельным каналам. К неявнополюсному ротору хладон подавался через форсунки со стороны бандажных колец.

При охлаждении стали, жидкий хладон из коллектора поступал в щелевой наполнительно-дозирующий коллектор, расположенный в средней части корпуса турбогенератора. Образовавшиеся в корпусе генератора пары хладона отводились по паровой трубе при работе по двухконтурной схеме в испаритель-конденсатор, а при работе по одноконтурной схеме – во всасывающую линию компрессора. При работе по двухконтурной схеме пары чистого хладона-12 конденсировались в испарителе-конденсаторе 3 за счет кипения хладона-22 в межтрубном пространстве аппарата и в виде жидкости стекали в расположенный ниже накопитель 6.

Для обеспечения надежной работы расходомеров и устойчивой работы герметичного насоса предусмотрен переохладитель 7, обслуживаемый вспомогательной холодильной машиной ХМФУ-40, в которой в качестве холодильного агента использовался хладон-22. Жидкий хладон из накопителя 6 поступал в переохладитель 7, охлаждался и направлялся в насос 11. Отделившаяся в корпусе НТГ жидкость через коллектор сливалась в накопитель, где смешивалась с конденсатом, поступающим из испарителя 3.

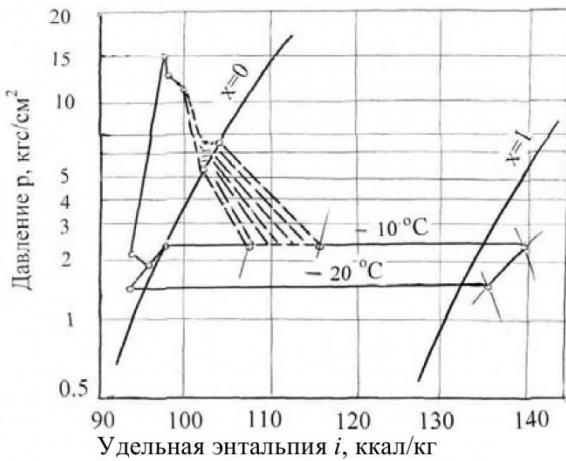


Рис. 2. Термодинамические процессы в насосно-циркуляционном контуре охлаждения НТГ ТК-3ф

Реальные рабочие процессы, происходящие в контуре, где активные элементы НТГ ТК-3ф играют роль испарителя, отображены на рис. 2 в координатах  $i - \lg P$ . При этом степень сухости парожидкостной среды хладона определяется как

нагрузкой, так и длиной гидравлической цепи.

*Контур поршневой холодильной машины.* Предварительные расчеты перспектив использования умеренного холода для охлаждения генераторов показали, что не следует стремиться к существенному снижению рабочих температур обмоток. С целью упрощения монтажа и эксплуатации холодильного оборудования, а также для уменьшения его габаритов была использована одноступенчатая паровая холодильная машина ХМ-22-ФУ-300 холододопроизводительностью 300000 ккал/ч при температурах кипения  $t_0 = -15^\circ\text{C}$  и конденсации  $t_k = 30^\circ\text{C}$ . В соответствии с условиями работы отдельные узлы холодильной машины подвергнуты некоторым изменениям.

При работе по двухконтурной схеме осуществляется обычный цикл холодильной машины. Из испарителя 3 пары R22 поступают в регенеративный теплообменник 2, откуда отсасываются компрессором 5, сжимаются и поступают в конденсатор 1, и затем жидкость через теплообменник 2 и регулирующий клапан 4 поступает в испаритель 3. Термодинамические процессы, происходящие при этом, имеют характер, соответствующий рис. 3.

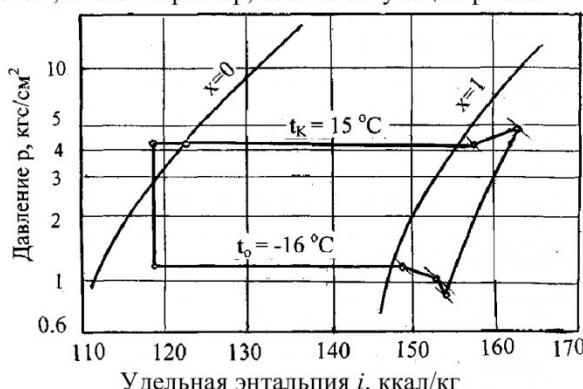


Рис. 3. Термодинамический цикл в контуре холодильной машины ХМ22ФУ-3000

При работе по одноконтурной схеме пары из корпуса генератора 14 вместе с отделившимися в испарителе 3 после дросселирования парами поступают во всасывающую линию компрессора 5, сжимаются и направляются в конденсатор 1. Из конденсатора жидкость проходит теплообменник 2, дросселируется через клапан 4 и поступает в виде парожидкостной смеси в межтрубное пространство испарителя 3, где разделяется на жидкость и пар. Жидкость сливается в накопитель 6 и через переохладитель 7 направляется в насос 11.

*Контур хладоновой защиты турбогенератора.*

□ Авторы статьи:

Старовойтов  
Владимир Алексеевич  
– канд. техн. наук, доц. каф.  
электропривода и  
автоматизации КузГТУ,  
тел.. 8(384-2)39-63-54

ра. В период остановки оборудования давление насыщения хладона-12 за счет подвода тепла из помещения машинного зала может повышаться до  $(5-7) \times 10^5$  Па. Для предотвращения повышения давления в корпусе выше допустимого установлена автоматизированная холодильная машина ХМ-ФУ-40П, которая периодически отсасывает пары хладона из корпуса турбогенератора. Излишек жидкого хладона из холодильной машины направляется в запасные емкости ресиверной станции (на схеме рис. 1 не указаны). Кроме того, в период работы экспериментального стенда холодильная машина ХМ-ФУ-40П обеспечивает подохлаждение жидкого хладона-12 перед насосом.

*Блок электроэнергетического оборудования стенда.* Для вращения вала турбогенератора установлен приводной электродвигатель постоянного тока МП-300-3000 мощностью 420 кВт, питающийся от преобразовательного агрегата с асинхронным приводным двигателем АК-114-6М мощностью 320 кВт и генератором постоянного тока ПА59/24-3 мощностью 300 кВт. Возбуждение приводного двигателя МП-300-3000 и генератора ПА59/24-3 – независимое от регуляторов напряжения и мостов на полупроводниковых диодах. Приводной электродвигатель обеспечивает плавное регулирование числа оборотов вала. Электрическая схема НТГ ТК-Зф выполнена с системой защиты от замыкания статорной обмотки на землю. В режимах короткого замыкания в цепях статорной обмотки, соединенной на звезду, предусмотрена установка измерительных трансформаторов для определения тока в обмотке.

Машинные и полупроводниковые преобразователи обслуживаются также электродвигатели масляных насосов подшипников и сальниковых уплотнений. Привод двух холодильных машин и герметичного хладонового насоса осуществляется асинхронными электродвигателями. Суммарная установленная мощность всех агрегатов стенда составляет около 1100 кВт. Все цепи питания электроприемников снабжены необходимыми средствами защиты, блокировками, измерения и сигнализации.

Для проведения теплоэнергетических исследований как основное, так и вспомогательное оборудование оснащено достаточным количеством датчиков с измерительными приборами повышенной точности, по большей части образцовыми.

Филимонов  
Сергей Гаврилович  
– канд. техн. наук, доц. каф.  
электропривода и  
автоматизации КузГТУ,  
тел.. 8(384-2)39-63-54