**УДК 621.313.322-81.017**

В.А. СТАРОВОЙТОВ, к.т.н., доцент (КузГТУ)
Д.В. ЧЕРНОВ, студент гр. ЭАб-121 (КузГТУ)
г. Кемерово

# ХЛАДОНОВОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ОБМОТОК СТАТОРА КРИОРЕЗИСТИВНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Открытие ряда высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) далеко отодвинуло температурную границу реализации явления сверхпроводимости и позволило на практике использовать сверхпроводящие материалы не только при температурах жидкого гелия (4,2 К), но и при температурах кипения жидкого азота (77,35 К), гораздо более дешевой криогенной субстанцией.

Последнее позволяет надеяться на интенсификацию работ по созданию новых сверхпроводящих турбогенераторов, наиболее удачным из которых можно считать СПТГ 20 МВА (бывший ВНИИЭМ).

Следует отметить: никто не может утверждать, что не появятся новые материалы, проявляющие свойства сверхпроводимости при более высоких температурах, чем азотные, например, температуры порядка 195 К (диоксид углерода $CO_2$) или же 232 К (хладон R22 – $CHClF_2$).

Однако в любом случае, независимо от уровня реализации сверхпроводимости полностью обнулить потери в обмотках статора с переменным током не удается, т.к. всегда имеет место резистивная составляющая.

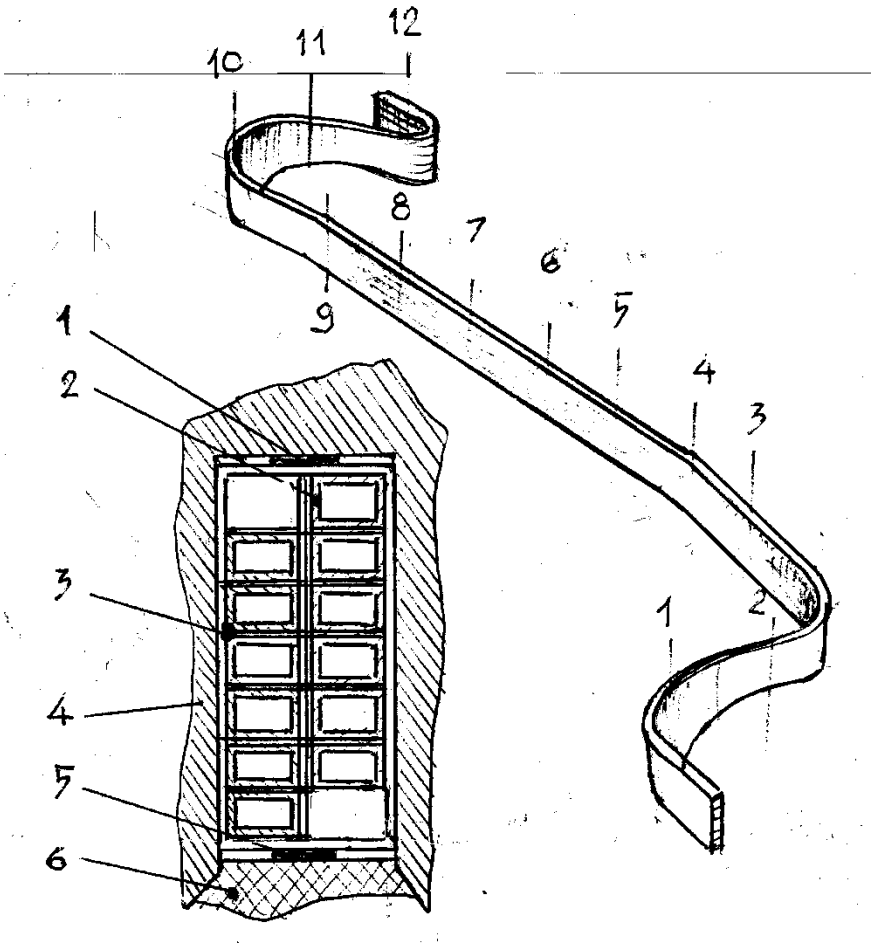
Механизм сверхпроводимости в проводниках с переменным током практически не изучен, однако известные экспериментальные оценки позволяют предположить, что эффективное сопротивление переменному току промышленной частоты (50-60 Гц) из-за потерь на гистерезис и вихревые токи составляют 0,0001 или менее от эффективного сопротивления обычного проводника при комнатной температуре.

Исходя из вышеизложенного представляет несомненный интерес исследование характера низкотемпературного охлаждения обмотки статора турбогенератора при температурах 243 К (-29,8°С) с помощью хладона R12 ($CCl_2F_2$).

В качестве объекта исследования использовался синхронный турбогенератор ТК-3-2 с неявно выраженным ротором со штатным форсированным водо-воздушным охлаждением ($P_Н$=3750 кВА, $I_Н$=5410 А, $U_Н$=400 В, Cos$\varphi$=0,8 и $n$ =3000 об/мин). Для работы с хладоном некоторые его конструктивные узлы были существенно видоизменены [1,2].

Обмотка статора однослойная состоит из 36 стержней, каждый из которых набран из 12 стандартных медных (электролитическая медь М 1,

отожженная с $\rho_{15}$=0,0175 Ом.мм$^2$/м) полых проводников сечением 7,4 х 5,0 мм и внутренними каналами 4,4 х 2,0 мм (рис. 1).




а) б)

Рис. 1. Стержень обмотки статоров турбогенератора: а) поперечное сечение; б) размещение термопреобразователей по длине стержня: 1,3,5 – термометры сопротивления; 2 – проводник; 4 – сталь; 6 – клин

Обмотка подразделена на 6 фазных зон по 60° эл. и имеет 6 полых токовых наконечником вне объема турбогенератора (3 для подвода хладоносителя и 3 для его отвода).

Каждый стержень снабжен наконечником, позволяющим осуществлять не только электрический контакт, но и гидравлическое их соединение. Благодаря последнему обстоятельству, а также наличию специально разработанных сегментных коллекторов с использованием тефлоновых соединений (трубки) имелась возможность коммутировать гидравлические цепи различной протяженности (правда, ступенчато) (рис. 2).

Холодильное оборудование, используемое для реализации хладонового охлаждения, в т.ч. обмотки статора, позволяло осуществлять

как однофазное (жидкостное), так и двухфазное (парожидкостное, или испарительное) охлаждение элементов генератора [3,4].

Жидкий фреон подается в обмотку статора под давлением, превращающее вскипание жидкости в процессе подвода тепла. В общем случае при жидкостном охлаждении насос должен обеспечить давление, равное сумме давлений, обеспечивающих как вскипание жидкости, так и давление преодоление гидросопротивлений каналов проводников обмотки статора. При этом имеет место оптимальный нагрев жидкости фреона в каналах, соответствующий минимальным энергетическим потерям в генераторе. Кроме того, систему жидкостного охлаждения можно рассматривать как однорежимную, при отклонении от оптимальных условий необратимые процессы в цикле возрастают и это ограничивает возможность их практического использования [4].

Альтернативой жидкостному охлаждению является двухфазное (испарительное). Известно, что коэффициенты теплоотдачи при принудительном движении кипящего потока охлаждающей жидкости значительно выше коэффициентов теплоотдачи при вынужденном движении жидкости.

Анализ механизмов теплообмена в системе параллельных трубчатых парогенерирующих проводников, которые представляют собой обмотку статора, осложняется наличием большого числа местных сопротивлений гидравлического тракта.

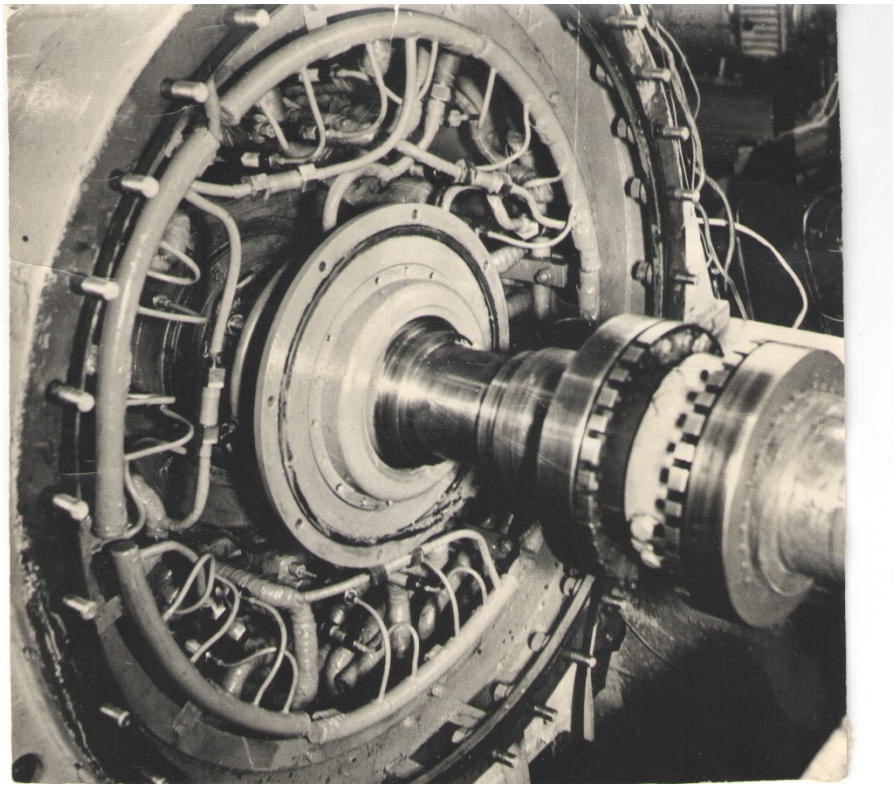


Рис. 2. Сегментный коллектор обмотки статора для организации раздачи хладона по стержням

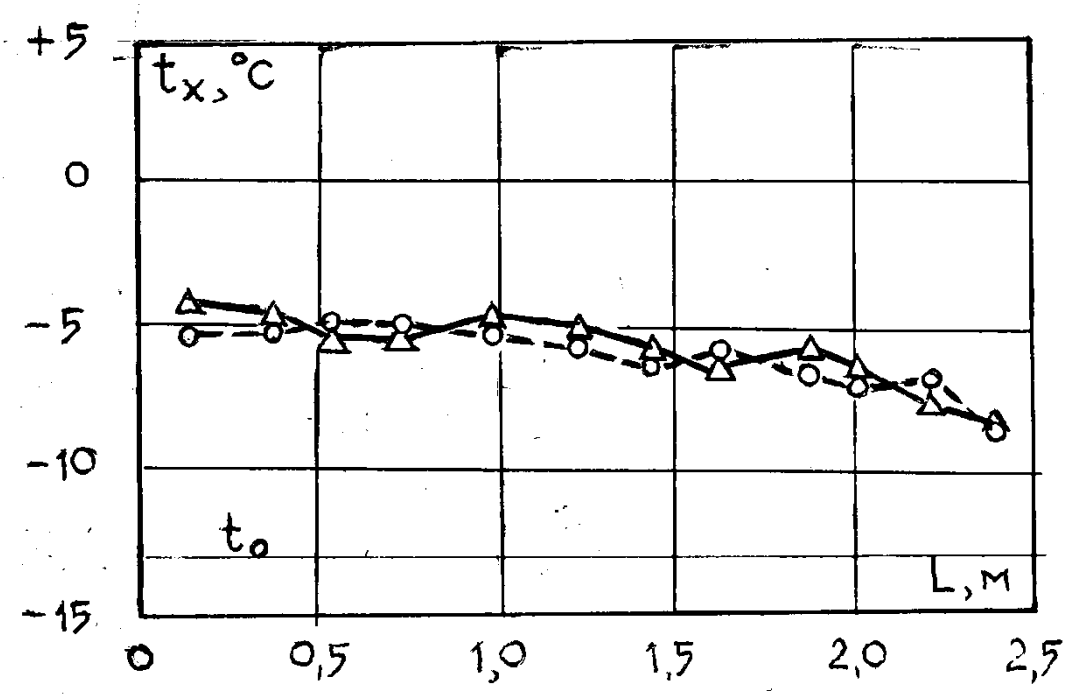



Рис. 3. Распределение температур по стержням обмотки статора турбогенератора: Δ – стержень 2, ○ – стержень 20

На рис. 3 представлены зависимости плотности тока в обмотке с переменным током по длине диаметрально расположенных стержней обмотки с переменным током. При этом плотность тока в статоре низкотемпературного генератора $j_{хг}$=17,1 А/м$^2$ соответствует плотности тока в обмотке «теплого» генератора. Нетрудно сравнить и уровни температур обмоток, которые в номинальном режиме при водяном охлаждении находятся на уровне 80-85°С (изоляция класса А). Отсюда видно, что испарительное низкотемпературное охлаждение вполне конкурентноспособно, имеет «запас прочности» по токовым нагрузкам и вполне может быть использовано в криорезестивных сверхпроводящих турбогенераторах.

Список литературы

1. Старовойтов, В. А. Турбогенератор с низкотемпературным охлаждением / В. А. Старовойтов, С. Г. Филимонов // Вестник КузГТУ, 2011. – № 4. – С. 38-42.
2. Старовойтов, В. А. Гермовыводы вращения криорезестивного турбогенератора // В сборнике: Наука и образование в жизни современного

общества сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 12 частях. – 2015. – С. 116-119.
3. Старовойтов, В. А. Гидросопротивления полых проводников низкотемпературного турбогенератора // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 30 июня 2014 г.: в 9 ч. Ч. 9. – Тамбов, 2014. — С. 99-101
4. Старовойтов, В. А. Однофазное жидкостное охлаждение обмоток статора низкотемпературного турбогенератора // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 28 февраля 2014 г.: в 12 ч. Ч. 8. – Тамбов, 2014. — С. 122-123