

УДК 621.593

Оценка эффективности жидкостной системы криостатирования силового кабеля из ВТСП

Соколова Е.В.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург

Руководитель: Баранов А.Ю., Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург

Для результативной работы ВТСП токоввода необходимо, чтобы температура ВТСП участка была меньше критической температуры перехода ВТСП проводника в нормальное состояние. Система криостатирования силового кабеля из ВТСП (высокотемпературного сверхпроводника) состоит из кабеля из ВТСП, погруженного в криостат, который заполнен движущимся криоагентом. Криостат обычно выполняют с вакуумным кожухом, в котором располагают трубопроводы возврата криоагента. Рефрижератор охлаждает криоагент до уровня температуры не ниже температуры кристаллизации. Движение криоагента побуждается криогенным жидкостным насосом. Поток криоагента движется по замкнутому маршруту. Длина половины маршрута зависит от интенсивности циркуляции криоагента и подвода теплоты, а также допустимой величиной перегрева жидкости окружающей ВТСП кабель. Расчет этого расстояния позволит ответить на вопрос: какой должен быть шаг между рефрижераторными станциями?

В качестве криоагента можно использовать жидкий азот, переохлажденный до температуры 66 К, и жидкий кислород, охлажденный до температуры 65 К. Криогенный жидкостной насос способен перекачивать жидкость с расходом $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ (или $96\,000 \text{ кг}/\text{ч}$ по жидкому азоту и $150\,000 \text{ кг}/\text{ч}$ по жидкому кислороду), КПД такого насоса около 0,76, а мощность электропривода насоса 9,7 кВт [1]. Давление в такой системе ограничено значением 3,5 МПа. При определении гидравлического сопротивления движению криоагента учитывается эффективный диаметр магистрали, так как поток криопродукта движется внутри кольца, ограниченного с одной стороны внутренним диаметром трубопровода D_v , а с другой стороны внешним диаметром токовводов D_n .

Тепловая нагрузка на систему криостатирования кабеля ВТСП является суммой следующих тепловых потоков: тепловыделения от переменного тока, подвода теплоты через токовводы, подвода теплоты от излучения через слоистую высоковакуумную изоляцию, теплота от трения криоагента в канале кабеля, теплота, выделяемая криогенным насосом. Тепловая нагрузка на систему криостатирования на уровне температур криогенных жидкостей составляет около $100 \text{ Вт}/\text{м}^3$ [2].

Численный эксперимент выполняется с помощью математической модели магистрали, которая состоит из системы уравнений: уравнения энергии, уравнений движения и неразрывности потока, а также уравнения, позволяющего вычислять теплофизические свойства жидкости, которые непрерывно меняются в процессе транспортирования криоагента по криостату. Критериями энергетической эффективности процесса транспортирования криогенной жидкости по трубопроводу является суммарная мощность гидравлических и тепловых потерь [3,4].

В результате эксперимента получено, что расстояние между соседними рефрижераторными станциями при использовании в системе криостатирования жидкого азота может достигать 14 км, а при использовании жидкого кислорода – 15 км. При этом внутренний диаметр трубопровода $D_e = 0,41 \text{ м}$, а внешний диаметр токовводов $D_n = 0,01 \text{ м}$. Жидкий азот подается в магистраль с расходом около $32000 \text{ кг}/\text{ч}$, его температура

повышается до температуры перехода ВТСП в нормальное состояние 90 К, а давление снижается до 0,7 МПа. Если использовать жидкий кислород, то расход составляет около 45000 кг/ч, а давление падает до 0,2 МПа.

Для оценки эффективности процесса криостатирования силового кабеля из ВТСП сравним значения суммарной мощности гидравлических и тепловых потерь: для жидкого азота значение этих потерь составляет 364 Вт/м³, для жидкого кислорода – 359 Вт/м³. Оказалось, что используя жидкий кислород расстояние между рефрижераторными станциями может быть на 1 км больше, что является определяющим в данной задаче, так как суммарная мощность потерь при этом оказалось равной.

Список литературы:

1. Каталог криогенных насосов [Электронный ресурс]. URL: http://ence-pumps.ru/kriogennye_nasosy.
2. Буянов Ю.Л. Тепловые потоки в тоководах, содержащих высокотемпературные сверхпроводники Электричество, 2015, № 11, с. 41–49.
3. Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Оптимизация криогенного трубопровода//Омский научный вестник - 2014. - № 3(133). - С. 164-168.
4. Логвиненко Е.В. Оптимизация криогенного трубопровода с помощью метода поиска парето-оптимального решения. В сборнике: Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО 2015. С. 110-112.