

$$d_{\text{ср}_3} \approx \frac{I}{m} \sqrt{\frac{f \mu(T) \mu_0 [k_y(T) (p_H + p_P) + (1+h(T)) \tau \beta]}{\pi \gamma_{\text{п}}^2 c_{\text{п}} (p_H + p_P)}}. \quad (12)$$

Л и т е р а т у р а

1. Мукосеев Ю.Л. Распределение переменного тока в токопроводах. М., - Л., 1959. 2. Проводниковые материалы. Под ред. Л.Ш. Казарновского. М., 1970. 3. Поспелов Г.Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. Минск, 1967.

В.Т. Федин, Ю.В. Белянчев

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ РАЗМЕЩЕНИИ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ВДОЛЬ ТРАССЫ КРИОГЕННОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Одним из важнейших элементов криогенных линий электропередач являются рефрижераторные установки, стоимость которых по исследованиям разных ученых составляет от 1/5 до 1/4 стоимости всей линии. От размещения рефрижераторных установок по трассе линии зависят условия охлаждения кабеля, а следовательно, и его электрические параметры, в том числе и важнейший из них — передаваемая по криогенной линии мощность.

В [1,2] отмечается, что должно существовать оптимальное размещение рефрижераторных установок по трассе криогенной линии электропередачи, так как в этом вопросе имеются два конкурирующих фактора: величина единичной мощности рефрижераторных установок, изменение которой приводит к изменению удельной стоимости этих установок и расстояния между ними, и вязкостные потери в охлаждающей жидкости.

Увеличение единичной мощности рефрижераторных установок приводит к снижению их числа, стоимости и увеличению расстояния между ними, что вызывает рост вязкостных потерь в охлаждающей жидкости и ухудшение условий охлаждения токоведущих частей. Снижение единичной мощности рефрижераторных

установок приводит к увеличению их числа и стоимости, но при этом снижаются вязкостные потери в охлаждающей жидкости и улучшаются условия охлаждения.

В [1,2] получены решения, позволяющие определять наибольшие расстояния между рефрижераторными установками по условию энтальпийного истощения хладагента на этом расстоянии.

В настоящей работе ставится задача определения расстояния между рефрижераторами по условию минимума приведенных затрат и сравнения его с расстоянием, соответствующим энтальпийному истощению хладагента.

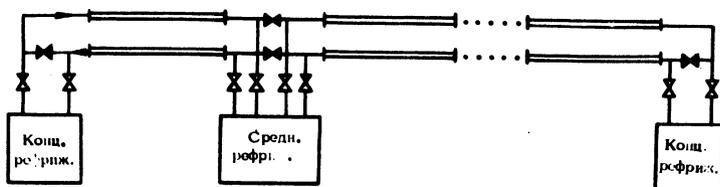


Рис. 1. Схема циркуляции хладагента.

Решение задачи рассматривается для замкнутой схемы циркуляции хладагента, представленной на рис. 1. При такой схеме благодаря наличию двух теплоизолированных охлаждающих каналов происходит лучшее охлаждение, и внутри кабеля поддерживается более постоянная температура по его длине. Система вентилей (заштрихованные — нормально закрыты, незаштрихованные — нормально открыты вентили) позволяет резервировать любую вышедшую из строя рефрижераторную установку.

В зависимости от конструкции криогенной линии рабочая температура токоведущих частей обеспечивается путем циркуляции одного или нескольких различных хладагентов. В криорезистивных линиях предполагается осуществлять охлаждение одним хладагентом, а в сверхпроводящих — двумя (основным и промежуточным). При этом конструктивно сечения каналов прямого и обратного потока хладагента могут быть выполнены как одинаковыми, так и различными.

Задавшись скоростью прямого потока хладагента v_1 , можно из условия непрерывности его циркуляции найти скорость обратного потока

$$v_2 = v_1 \frac{F_1}{F_2}, \quad (1)$$

где F_1, F_2 — сечения прямого и обратного потоков хладагента. При равенстве сечений скорости прямого и обратного потоков хладагента одинаковы. Вязкостные потери в потоке хладагента можно определить по формуле

$$q_{\text{в}} = k_{\text{тр}} \frac{FV^3\rho}{2d}, \quad (2)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения в потоке, зависящий от числа Рейнольдса; d — гидравлический диаметр охлаждающего канала; ρ — плотность хладагента.

Расстояние между рефрижераторами определим из условия теплового баланса в глубокоохлаждаемой зоне хладагента

$$l = \frac{\rho \Delta i (V_1 F_1 + V_2 F_2)}{q_1 + q_{\text{в}1} + q_{\text{в}2}}, \quad (3)$$

где q_1 — удельный теплоприток и тепловыделения в зоне хладагента; Δi — разность энтальпий потока хладагента между соседними рефрижераторными установками, зависящая от температуры и давления на концах участка.

Зная расстояние между рефрижераторными установками, можно определить количество средних рефрижераторов, как

$$n_p = \frac{L}{l} - 1, \quad (4)$$

где L — длина криогенной линии.

Так как число рефрижераторов не может быть дробным, то полученное число необходимо округлить до ближайшего целого числа.

Определив таким образом гидродинамические параметры хладагента и расстояние между рефрижераторами, можно найти холодопроизводительность рефрижератора

$$Q_p = \rho \left[V_1 F_1 \left(\Delta i + k_{\text{мп}1} \frac{V_1}{2d_1} l \right) + V_2 F_2 \left(\Delta i + k_{\text{мп}2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{V_2}{2d_2} l \right) \right]. \quad (5)$$

Стоимость и мощность рефрижераторной установки можно выразить через их холодопроизводительность в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{pc} = a + \sum_{j=1}^N b_j Q_p^{n_j} ; \\ P_{pc} = c + \sum_{j=1}^N d_j Q_p^{m_j} . \end{array} \right. \quad (6)$$

Здесь индекс "с" определяет принадлежность этих величин к средним рефрижераторам. Для нахождения же стоимости $K_{рк}$ и мощности $P_{рк}$ конечных рефрижераторов, несущих вдвое меньшую нагрузку по отводу тепла, в формулы (6) следует подставлять вдвое меньшую величину холодопроизводительности. Следует отметить, что учет конечных рефрижераторов носит условный характер и применяется для исследования собственно линии, тогда как в действительности охлаждение конечных участков линии будет осуществляться от мощных подстанционных рефрижераторных установок, охлаждающих криогенные трансформаторы, токопроводы, выключатели и другие элементы электроспередачи.

Выражение приведенных затрат для зоны хладоагента будет иметь вид

$$Z = p (n_p K_{pc} + 2K_{рк}) + c_{\text{э}} \tau (n_p P_p + 2P_{рк}) , \quad (7)$$

где p — доля отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание рефрижераторных установок с учетом коэффициента эффективности капиталовложений; $c_{\text{э}}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, расходуемой на привод рефрижераторных установок; τ — число часов работы рефрижераторных установок.

Таким образом определяются приведенные затраты для зоны основного и промежуточного хладоагентов.

По описанной методике была составлена блок-схема расчета, приведенная на рис. 2, и программа расчета на ЭЦВМ "Минск-22", которая позволяет оптимизировать такие криогенные параметры конструкции кабеля, как сечения теплоизолирующих слоев, сечение канала промежуточного хладоагента и другие, а также находить оптимальные расстояния между рефрижераторами основного и промежуточного хладоагентов.

По этой программе была проведена серия расчетов с целью выяснения характера зависимостей расстояния между рефрижераторами от скорости прокачки хладагента $l = f(V)$ и удельных приведенных затрат от расстояния между рефрижераторами $z_y = f(l)$ для двухцепной коаксиальной конструкции сверхпроводящей линии, в которой в качестве основного хладагента был принят жидкий гелий в сверхкритическом состоянии, в качестве промежуточного — жидкий азот. Материал сверхпроводника — ниобий, электроизоляция выполнена в виде лент из диэлектрика (лавсана). Роль теплоизоляции выполняют два слоя вакуума.

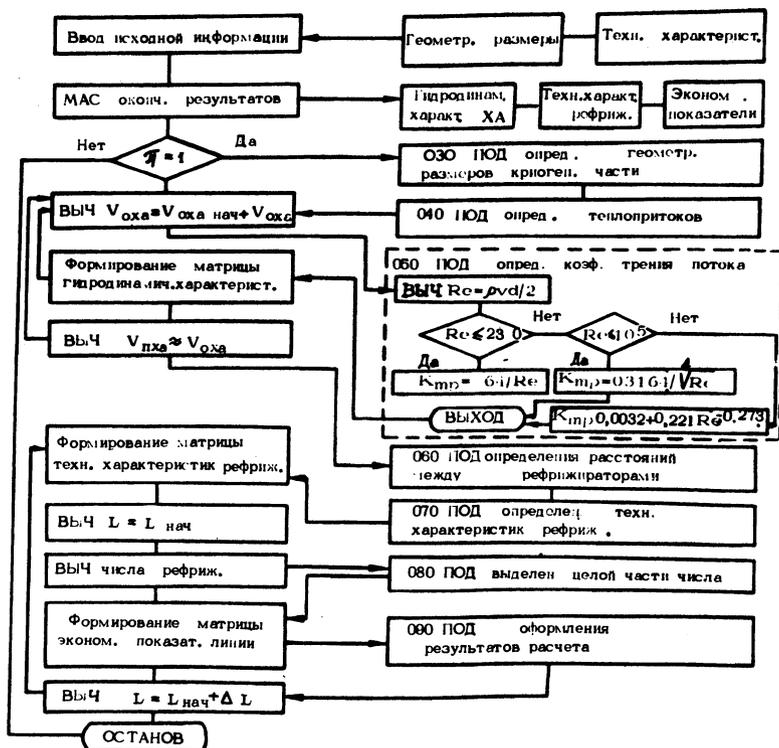


Рис. 2. Блок-схема расчета технико-экономических показателей криогенной линии.

На рис. 3 приведена зависимость $l = f(V)$, а на рис. 4 — зависимость относительных удельных приведенных затрат z_y^* , определенных по отношению к наименьшим затратам для данного варианта, в функции расстояния между гелиевыми реф-

рижераторами. Зависимости приведены для значений передаваемой мощности 3 и 5 ГВт. Характер зависимостей для других конструктивных и режимных параметров линии оказался аналогичным.

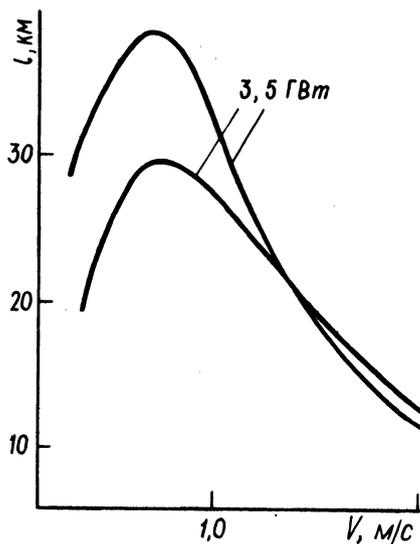


Рис. 3. Зависимость расстояния между рефрижераторами от скорости прокатки хладагента.

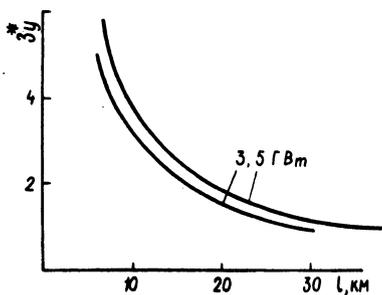


Рис. 4. Зависимость относительных удельных приведенных затрат от расстояния между рефрижераторами.

Из приведенных зависимостей видно, что оптимальное расстояние между гелиевыми рефрижераторами равно наибольшему расстоянию между ними. С ростом передаваемой мощности оптимальное расстояние между рефрижераторами увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением передаваемой мощности растут геометрические размеры кабеля, в том числе сечения и гидравлические диаметры каналов охлаждения и, следовательно, облегчаются условия охлаждения, в то время как потери мощности в сверхпроводнике и электроизоляции малы по абсолютной величине и возрастают незначительно.

Для рассмотренного случая оптимальное расстояние между азотными рефрижераторами при передаче мощности 3 ГВт составило 15,7 км, а при передаче 5 ГВт — 16,0 км.

В связи с тем, что в настоящее время стабильных цен на рефрижераторное оборудование и криогенные материалы нет, к

полученным абсолютным значениям следует подходить осторожно.

В заключение следует заметить, что несомненный интерес представляет решение задачи оптимального совместного размещения рефрижераторных установок основного и промежуточного хладагентов по трассе сверхпроводящей линии.

Л и т е р а т у р а

1. Блинков Е.Л., Гольденберг Е.С. Оптимизация условий циркуляции хладагентов в криогенных кабелях. — "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт". М., 1972, № 4. 2. Вилкинсон К. Перспективы использования проводников при низкой температуре в силовых кабелях и трансформаторах. — "Радиотехника сверхвысоких частот и квантовая радиотехника", 1968, № 23.

Ю.В. Белянчев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОАКСИАЛЬНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

По мнению отечественных и зарубежных исследований, одним из перспективных может быть способ передачи электроэнергии по сверхпроводящим линиям.

В настоящей работе предполагается исследовать влияние некоторых режимных и конструктивных параметров сверхпроводящего кабеля на его экономические показатели с целью определения оптимальных значений этих параметров.

Были проведены исследования для одной из предпочтительных конструкций сверхпроводящей линии — фазно-коаксиальной конструкции [1]. В качестве сверхпроводящего материала в ней принят ниобий, нанесенный на подложку из гофрированной медной трубки. Электроизоляция выполнена из твердого диэлектрика типа тефлона. Для снижения теплопритоков к глубоководяемой гелиевой зоне служит азотный экран, теплоизолированный от окружающей среды и гелиевой зоны вакуумными полостями. Фаза этой линии выполнена из двух коаксиальных труб, которые располагаются в вершинах равностороннего треугольника, образуя трехфазную систему.