

При условии $M = \text{const}$ решение (5) значительно упрощается, и выражение для максимального внутреннего напряжения стержня принимает вид:

$$s_{\max} = \frac{h_n M}{J_x} = \frac{E}{1 + \frac{\frac{1}{b} + Q_1 - Q_0}{Q_n - Q_1} \frac{h_{\text{СТ}}}{h_n}}, \quad (16)$$

где h_n — высота от дна паза до нейтральной линии сечения стержня, м; $h_{\text{СТ}}$ — высота стержня, м; Q_0 , Q_1 , Q_n — начальная температура и значения температуры нижнего и верхнего элементарных слоёв стержня.

В соответствии с изложенным были рассчитаны вытеснение тока, нагрев и внутренние механические напряжения в массивном стержне бутылочной формы высотой 42 мм двигателя 4АН315М2У3 мощностью 250 кВт с сильным проявлением вытеснения тока (коэффициент увеличения активного сопротивления в момент пуска $K_R = 3,5$). Результаты расчёта представлены на рис. 2. Был рассчитан затяжной пуск при нагрузке для случая учета теплоотдачи при $k_Q = 0,5$ (пуск без нагрузки — 0,58 с).

* * *

Оптимизация характеристик высокотемпературных сверхпроводящих кабелей путем их секционирования

КОПЫЛОВ С.И., КРИВЕЦКИЙ И.В., ЖЕЛТОВ В.В., СЫТНИКОВ В.Е.

Предложена модель и разработана программа расчета секционированного биполярного ВТСП кабеля для линий электропередачи большой мощности (~20 кВ, ~100 кА). Секционирование позволяет увеличить ток в ВТСП кабеле тем в большей степени, чем существеннее зависимость критической плотности тока сверхпроводника от индукции магнитного поля. Увеличение эффективности с ростом числа секций имеет тенденцию к насыщению. Поэтому для биполярных кабелей с критическим током 10–100 кА оптимальное число секций находится в пределах от пяти до восьми.

Ключевые слова: линии электропередачи, ВТСП кабели, магнитное поле, ток, моделирование, расчет

По ВТСП кабелю возможна передача как переменного, так и постоянного тока. Особый интерес представляет передача постоянного тока. За счет большой плотности тока передача может осуществляться при относительно небольшом напряжении [1].

Как видно из рис. 2, перепад температур Q_n и Q_1 между верхним и нижним слоями стержня через 3,5 с нагрева достигает 200 °С, что объясняется высокими плотностями тока в верхних слоях стержня, превышающими 400 А/мм². При этом уже в момент времени $t = 0,35$ с возникают пластические деформации в стержне (предел текучести алюминия $s_T = 50$ МПа), а при $t = 0,75$ с происходит надрыв стержня у дна паза (предел прочности алюминия $s_{\text{Вр}} = 85$ МПа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клоков Б.К.** Расчёт вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации. — Электротехника, 1969, № 9.
2. **Самарский А.А.** Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971.

Автор: Фисенко Валерий Григорьевич окончил электромеханический факультет Московского энергетического института в 1972 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Разработка метода расчета переходных процессов асинхронных двигателей с учетом вытеснения тока и двусторонней зубчатости сердечников» в 1990 г. Доцент кафедры электромеханики «НИУ «МЭИ».

The model of a bipolar high-temperature superconducting (HTS) cable intended for constructing high-capacity power lines (~20 kV and ~100 kA) is proposed, and a computer program for calculating it is developed. By using a sectioned design, the current through HTS cable can be increased (the stronger the dependence of current density in the superconductor on the magnetic field induction, the higher the degree of increasing the current-carrying capacity). The effectiveness tends to saturate as the number of section increases. Therefore, for bipolar cables with critical currents ranging from 10 to 100 kA, the optimal number of sections is from five to eight.

Key words: power lines, HTS cables, magnetic field, current, simulation, calculation

В [2] ВТСП кабель (рабочий ток 20 кА) состоит из многослойных лент, соединенных параллельно в секции с различным шагом скрутки и числом лент в секции. При этом внешние секции имеют меньшую индуктивность, чем внутренние, и распределение токов таково, что во внешних секциях ток

больше, чем во внутренних. Предложенный в [2] кабель состоит из шести секций, при этом токи в трех внутренних секциях и трех внешних разнонаправлены.

В статье рассматриваются варианты исполнения кабелей с различным числом нетвистированных секций, в которых токи соседних секций имеют взаимно противоположное направление.

Критическая плотность тока сверхпроводника существенно зависит от локального магнитного поля B . Количественно эту зависимость можно определить моделью [3]: $j_c = a / |B|^g$, где a и g — константы, зависящие от свойств сверхпроводника. Поскольку распределение локального магнитного поля по сечению кабеля зависит от конструктивно-го исполнения передающей линии, последнее определяет эффективность использования сверхпроводника.

При биполярной передаче прямой и обратный кабели совмещаются в одной конструкции. Обычно они представляют собой две соосные цилиндрические секции, изолированные друг от друга, токи в которых текут во взаимно противоположном направлении. При $g=0$ площади сечения секций равны между собой, но при увеличении g необходимая площадь поперечного сечения внешней секции уменьшается. Это связано с размагничивающим влиянием поля внутренней секции на поле внешней, благодаря которому во внешней секции снижается локальное магнитное поле и возрастает критическая плотность тока. Таким образом, использование уже этого простейшего варианта конструкции позволяет снизить расход материала сверхпроводника.

Дальнейшей экономии можно достичь, разбивая сечение кабеля на несколько соосных изолированных секций, которые подключаются так, что токи соседних секций текут во взаимно противоположном направлении.

Расчет характеристик секционированного кабеля. Распределение локального магнитного поля по сечению сверхпроводника описывается уравнением

$$\operatorname{rot} B = m_0 j_c, \quad (1)$$

которое в цилиндрической системе координат, с учетом модели критического состояния [3] принимает вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r, B) = m_0 \frac{a}{|B|^g}. \quad (2)$$

Решая (2), получим значение поля секции n в точке сверхпроводника с текущей координатой r :

$$B_n(r) = \frac{\operatorname{sgn}(A_n)}{r} g^{+1} \sqrt{|A_n|}, \quad (3)$$

где

$$A_n = (r_n B(r_n))^{g+1} + \operatorname{sgn}(J_n) \frac{g+1}{g+2} m_0 a (r^{g+2} - r_n^{g+2}); \quad (3a)$$

$B(r_n)$ — поле на внутреннем радиусе секции n ; $\operatorname{sgn}(J_n)$ — функция знака тока в секции n : $\operatorname{sgn}(J_n) = 1$ при $J_n \geq 0$ и $\operatorname{sgn}(J_n) = -1$ при $J_n < 0$; $\operatorname{sgn}(A_n)$ — функция знака A_n .

Значение $B(r_n)$ определяется по закону полного тока, примененному к секциям, внутренним по отношению к рассчитываемой:

$$B(r_n) = \frac{m_0}{2pr_n} \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (3b)$$

Расчет по (3) начинается с внутренней секции, для которой значения внутреннего и внешнего радиусов задаются как аргументы, а $B(r_1) = 0$. Ток секции

$$J_1 = \frac{2pR_1}{m_0} B(R_1). \quad (4)$$

Этого значения достаточно для определения начального значения поля в следующей секции по (3b) и, следовательно, для расчета распределения поля в ней по (3) и (3a). Расчет следующих секций выполняется аналогично с учетом следующих особенностей.

1. При $n=1$ для расчета тока секции вместо (4) используется более общее соотношение, которое также следует из закона полного тока:

$$J_n = \frac{2pR_n}{m_0} [B(R_n) - B(r_n)] + \frac{R_n - r_n}{r_n} \sum_{k=1}^{n-1} J_k. \quad (5)$$

2. Значения внешних радиусов секций с номерами от $n=2$ до $n=N-1$ подбираются в процессе расчета из условия $J_n = (-1)^{n+1} 2J_1$.

3. Ток последней секции должен быть равен: $J_N = (-1)^{N+1} J_1$.

Условие п.2 обеспечивает минимизацию значения среднего магнитного поля в секции и, следовательно, — максимум средней критической плотности тока. Условие п.3 позволяет получить значение индукции магнитного поля на внешней границе кабеля $B(R_n) = 0$.

Результаты расчетов. Общее представление об эффективности секционирования дает рис. 1, на котором представлены результаты расчетов, выполненных в пренебрежении размерами формера и размерами зазоров между секциями ($R_0 = r_1 = 0$ и $d = 0$, т.е. $R_{n-1} = r_n$).

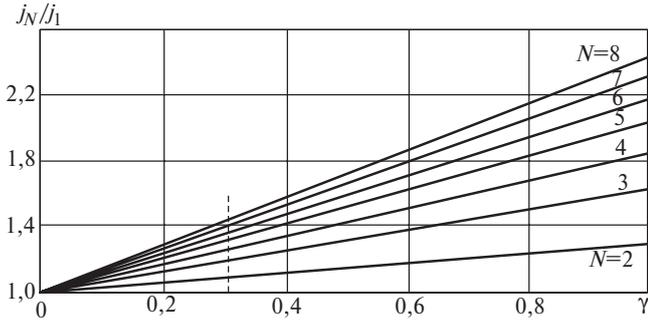


Рис. 1. Отношение средней плотности тока в секционированном биполярном кабеле, состоящем из N секций, j_N к плотности тока в униполярном кабеле j_1 ; - - - обозначена прямая, на которой лежит зависимость j_N / j_1 для $g = 0,3$

На рис. 2 приведены примеры распределения поля по сечению пятисекционных кабелей с радиусом формера $R_0 = 5$ мм. При расчете кабеля рис. 2,а принимались характеристики сверхпроводника, соответствующие материалу, производимому фирмой Bruker [4]: $g = 0,3$; $a = 2,124 \cdot 10^6$ ТлА/м². Для кабеля рис. 2,б принято $g = 1$ при тех же значениях a и k_3 .

Влияние геометрических размеров кабеля (габаритного размера, числа секций и размера зазоров между ними) на его пропускную способность иллюстрирует рис. 3.

Как показали расчеты, ток в кабеле растет с увеличением числа секций. Увеличение габаритного размера кабеля также ведет к увеличению тока, однако плотность тока при этом снижается. В слу-

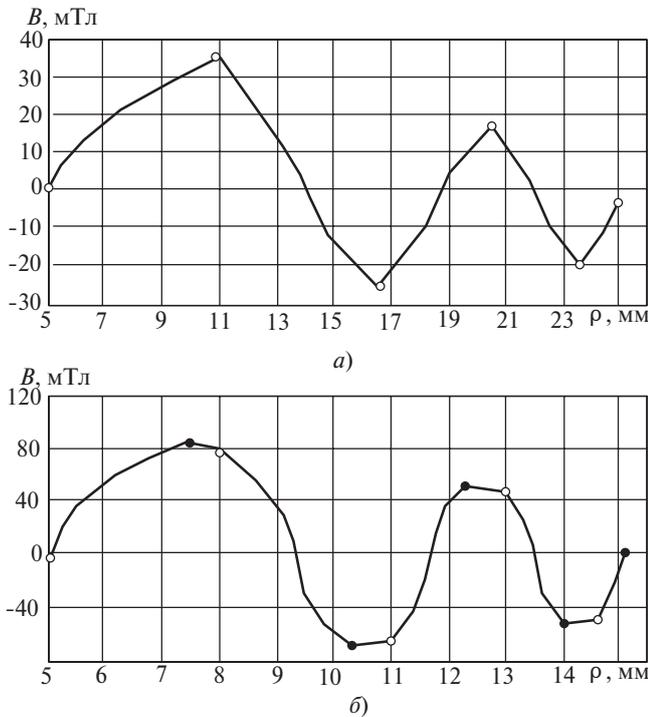


Рис. 2. Распределение магнитного поля по сечению кабеля: а — $J_c = 7,88$ кА; $R_0 = 5$ мм; $d = 0$; ○ — границы секций; б — $J_c = 13,6$ кА; $R_0 = 5$ мм; $d = 0,63$ мм; ○ — начало секции, ● — окончание секции

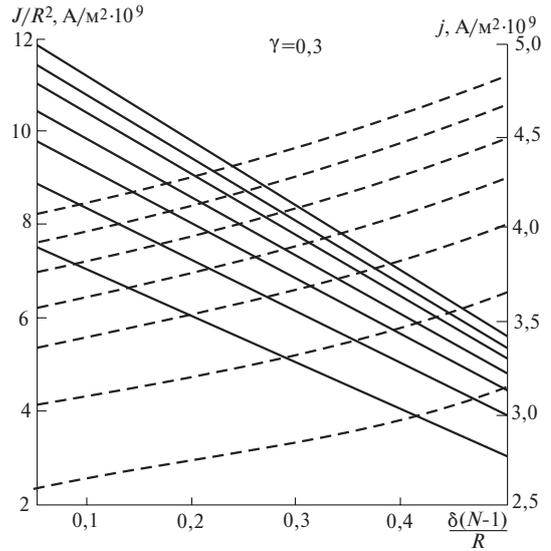


Рис. 3. Полный критический ток кабеля J_c [А] и средняя критическая плотность тока по его сечению j_c [кА/м²] при количестве секций от $N = 2$ (нижние кривые) до 9 (верхние кривые) при небольших зазорах d : — J_c ; - - - j_c

чае увеличения зазоров между секциями плотность тока возрастает, но полный ток кабеля при этом снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытников В.Е. Сверхпроводящие кабельные линии: состояние вопроса и перспективы. — Академия энергетики, 2011, декабрь, № 6 [44].
2. Wang Y., Zhang F., Gao Z et al. Development of a high-temperature superconducting bus conductor with large current capacity. — Superconductor Science and Technology, 22 (2009) 055018 (5pp).
3. Irie F., Yamafuji K. Theory of Flux Motion in Non-Ideal Type-II Superconductors. — Journal of The Physical Society of Japan, 1976, August, vol. 23, № 2.
4. <http://www.bruker-est.com>

Авторы: Копылов Сергей Игоревич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1979 г. В 2005 г. в МЭИ защитил докторскую диссертацию «Секционирование сверхпроводящих магнитных систем статических индуктивных регулирующих устройств». Заведующий лабораторией инновационных технологий в области сверхпроводимости ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Кривецкий Игорь Владимирович окончил Институт электротехники МЭИ в 2011 г. Специалист I категории отдела инновационных технологий в области сверхпроводимости ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», аспирант кафедры электромеханики «НИУ «МЭИ».

Желтов Владимир Валентинович окончил теплоэнергетический факультет МЭИ в 1969 г. В 1978 г. в ОИВТ РАН защитил кандидатскую диссертацию «Гистерезисные потери в сверхпроводящих материалах». Старший научный сотрудник ОИВТ РАН.

Сытников Виктор Евгеньевич окончил Ждановский металлургический институт в 1972 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию. Заместитель научного руководителя ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».