

## REFERENCES

1. Glouskin I.Z., Iof'yev B.I. *Protivoavarijnaya avtomatika v energosistemakh, t. I* (Emergency control in power systems, vol. I) Moscow, Publ. «Znack», 2009, 568 p.
2. Glouskin I.Z., Iof'yev B.I. *Protivoavarijnaya avtomatika v energosistemakh, t. II* (Emergency control in power systems, vol. II). Moscow, Publ. «Znack», 2011, 528 c.
3. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv i system v Simulink* (Simulation of electrical devices and systems): www.matlab.exponenta.ni/simpower /bookl/index.php
4. Vazhnov A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* (Transients in AC machines). Leningrad, Publ. «Energia», 1980, 256 p.
5. Gluskin I.Z., Narovlyanskii V.G. *Sverkhprovodnikovyye tokoogranichivayushchiye ustroystva i...* (Superconducting current

limiting device and inductive energy storage for electric power systems). Moscow, Energoatomizdat, 2011, 373 p.

6. Ter-Gazarian. *Energy Storage for Power System*. 2nd edit. — London (UK): The Institution of Engineering and Technology, 2011, 276 p.
7. <http://www.mathworks.com/help /physmod/sps/index.html>
8. [http://econd-spb.ru/#/c\\_343](http://econd-spb.ru/#/c_343)
9. <http://www.rusbat.com/Interbat20160323/NovikovInterbat160323.pptx>
10. <http://www.zkem.com.ua/dvigateli-reversivnie-ryada-p2-21-25-gabaritov.html>
11. Gulia N.V. *Izobretatel' i ratsionalizator — in Russ. (Inventor and Innovator)*, 2005, No. 12(672), p. 14.

\* \* \*

*Электричество*, 2016, № 12, с. 27–33.

## Влияние секционирования на потери в устройствах переменного тока с бифилярными высокотемпературными сверхпроводящими обмотками

ЖЕЛТОВ В.В., КОПЫЛОВ С.И., КОПЫЛОВА Л.Н., ЛИПА Д.А., ПОПОВА М.В.

*Примерами использования бифилярных обмоток на переменном токе могут служить сверхпроводящие ограничители тока резистивного типа, послойные обмотки ограничителей тока трансформаторного типа, сверхпроводящие трёхфазные кабели высокого напряжения, фазы которых экранированы сверхпроводником и т.д. В статье представлены результаты расчётов гистерезисных и матричных потерь в несекционированных и секционированных биполярных кабелях переменного тока. Рассмотрены кабели осесимметричного сечения и плоские кабели. Показано, что для кабелей обоих сечений секционирование является эффективным способом снижения потерь.*

*Ключевые слова: кабели, переменный ток, бифилярные обмотки, секционирование, расчёт потерь*

Примерами использования бифилярных обмоток на переменном токе могут служить сверхпроводящие ограничители тока резистивного типа [1, 2], послойные обмотки ограничителей тока трансформаторного типа [3], а также сверхпроводящие трехфазные кабели высокого напряжения, фазы которых экранированы сверхпроводником [4, 5]. В последнем случае каждая фаза с экраном фактически представляет собой бифилярный кабель.

Ниже представлены результаты расчёта гистерезисных и матричных потерь в несекционированных и секционированных биполярных кабелях переменного тока. Рассмотрены кабели осесимметричного поперечного сечения и плоские кабели. Показано, что для кабелей обоих сечений секционирование является эффективным способом снижения потерь. Расчёты проводились по программе, алгоритм которой описан в [6].

Во всех кабелях использовались высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) ленты SCS-4050 фирмы SuperPower. Лента представляет собой многослойный композит. Порядок чередования слоев и их толщины следующие: стабилизирующее медное покрытие 20 мкм; подложка из хастеллоя 50 мкм, буферные слои общей толщиной

0,2 мкм; сверхпроводящее покрытие 1 мкм; серебряное покрытие 2 мкм; стабилизирующее медное покрытие 20 мкм; ширина ленты — 4мм; критический ток ленты  $J_{CL}$  — от 80 до 110 А.

### Анализ общих особенностей конструкции кабелей.

Простейшим вариантом расчета потерь в кабеле осесимметричного поперечного сечения является представление его в виде концентрически расположенных колец. При этом каждое кольцо рассматривается как сплошной сверхпроводник с усредненной по его сечению плотностью критического тока (приближение композита). Потери в такой аппроксимации легко рассчитать аналитически. В частности, для однофазного кабеля результат можно получить как частный случай соотношений [7]:

$$Q_{hr} = \mu_0 J_C^2 \left[ \frac{2\gamma\eta + 2mI - m^2 I^2}{2\pi m^2} \right], \quad (1)$$

где  $Q_{hr}$  — гистерезисные потери на 1 м длины сверхпроводника за цикл изменения тока, Дж/м;  $I = \Delta J / J_c$  — безразмерная амплитуда колебаний тока;  $m$  — параметр, характеризующий отношение внутреннего диаметра кольца  $d$  к внешнему  $D$ ;  $m = 1 - d^2 / D^2$ ;  $\gamma = 1 - mI$ ;  $\eta = Ln(\gamma)$ .

Аналитический расчет удобен для первоначальной оценки, однако его точность существенно зависит от конкретных характеристик реальной конструкции. В частности, для кабелей, состоящих из ВТСП лент, ошибка может достигать сотен процентов.

Аппроксимируем кабель осесимметричного поперечного сечения системой соосных правильных многоугольников (рис. 1). Каждый сверхпроводящий слой (многоугольник) характеризуется радиусом вписанной в многоугольник окружности  $r$ . Число сторон многоугольника  $n$ , естественно, равно числу лент, образующих слой, длина стороны многоугольника  $a$  равна ширине ленты. Модель учитывает две важные особенности реальной конструкции – локальные нарушения аксиальной симметрии магнитного поля вдоль периметров сверхпроводящих слоев и дискретное распределение этих слоев по толщине кабеля.

Нарушение аксиальной симметрии приводит к появлению составляющей поля, перпендикулярной к поверхности лент, которая значительно увеличивает потери. Влияние этого фактора иллюстрируется на рис. 2. Влияние на  $Q_h$  числа сторон многоугольника возрастает на границах диапазона изменения  $I$ . При малых амплитудах увеличение потерь незначительно и объясняется ускоренным проникновением токов в участки, прилегающие к углам многоугольника. По мере увеличения амплитуды фронт насыщенной зоны перемещается внутрь многоугольника, одновременно принимая форму, более близкую к окружности (т.е. «срезаются» угловые части). Этим обусловлено улучшение ситуации в области средних значений амплитуд колебаний тока. При значениях  $I$ , близких к единице, осевая симметрия поля нарушается в результате

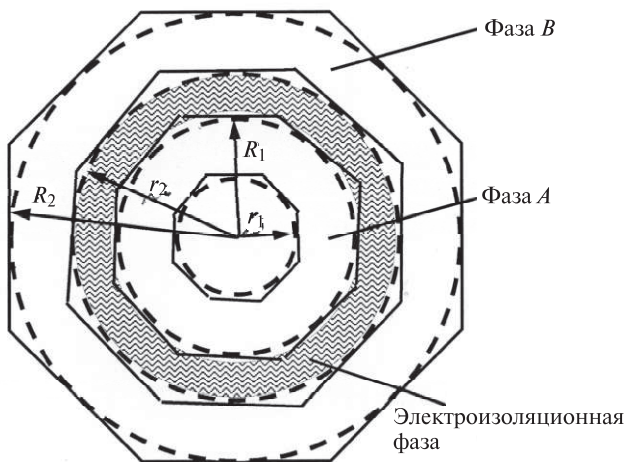


Рис. 1. Поперечное сечение биполярного кабеля; сечения фаз – правильные многоугольники;  $r_1, R_1$  – радиусы окружностей, вписанных, соответственно, во внутренний и внешний периметры фазы  $A$ ;  $r_2, R_2$  – то же для фазы  $B$

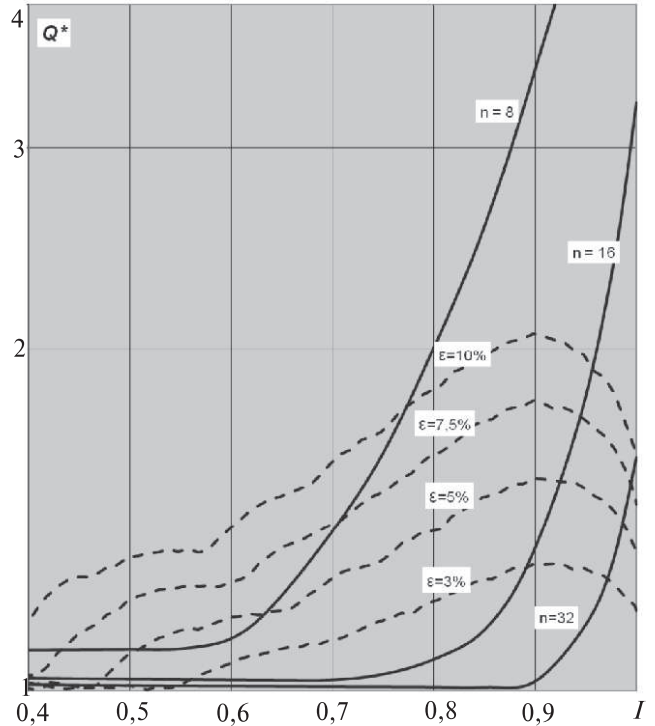


Рис. 2. Зависимость гистерезисных потерь в однофазном кабеле многоугольного сечения от числа сторон многоугольника  $n$  и размера зазора между сторонами многоугольника  $\delta$ . Расчет в приближении композита:  $Q_{hr}$  – потери в кабеле кольцевого сечения;  $m = 0,015$ ;  $\epsilon = \delta/a \times 100\%$ ; сплошная линия –  $Q^* = Q(n, \epsilon = 0)/Q_{hr}$ ; штриховая –  $Q^* = Q(n = 16, \epsilon)/Q(n = 16, \epsilon = 0)$

полного насыщения торцевых участков лент. Характеристики кабеля должны обеспечивать экономичный расход сверхпроводника и устойчивость работы при незначительных (не приводящих к аварийному отключению сети) превышениях номинального тока. Поэтому для практики важен диапазон изменения амплитуды номинального тока  $0,5 < I < 0,9$ . Видно, что для этого интервала оптимальны значения  $n > 16$ . В реальной конструкции неизбежно наличие зазоров между лентами в слое (сторонами многоугольника). Зависимости от  $\epsilon$  показывают, что желательно выдерживать размер зазоров не более 3–5% ширины ленты.

Из (1) следует, что  $Q_{hr} \rightarrow 0$  при  $m \rightarrow 0$ . Численные расчеты для многослойной конструкции из многоугольников демонстрируют практически такую же зависимость от  $m$ , что и (1), если для определения  $m$  используется суммарная толщина слоев. Следовательно, целесообразно уменьшать число слоев и располагать их максимально плотно. Радикально уменьшаются потери при переходе к двух- или однослойной конструкции. В этом случае эффективное значение  $m$  определяется уже толщиной не ленты, а сверхпроводящего слоя, который меньше на два порядка. Разумеется, реализация этого эффекта в полной мере возможна лишь при круговой форме слоя. Однако расчеты показывают воз-

возможность уменьшения потерь на 1–1,5 порядка и для многоугольной конструкции при  $n > 16$ . К сожалению, вариант двухслойной, а тем более однослойной конструкции не всегда совместим с требованиями по критическому току и габаритам кабеля.

Объединение двух уединенных (т.е. индуктивно не связанных) однофазных кабелей кольцевого поперечного сечения в биполярный кабель не меняет значения потерь во внутреннем кольце (внутренней фазе). Изменения во внешней фазе обусловлены только условиями проникновения тока – проникновение начинается с внутреннего, а не с внешнего периметра кольца. Это приводит к увеличению потерь при малых значениях  $I$  и к их уменьшению при  $I$ , близких к единице. Очевидно, при малой толщине кольца (а в реальных конструкциях, как правило,  $m$  значительно меньше единицы) такие изменения не могут быть существенными. В многоугольной конструкции за счет нарушения осевой симметрии поля наблюдается изменение потерь в обеих фазах. Однако расчеты показывают, что при  $n > 16$  эти изменения не выходят за пределы 15%. Следовательно, можно утверждать, что гистерезисные потери в осесимметричном биполярном кабеле практически равны сумме потерь в уединенных фазах той же геометрии.

Это утверждение, однако, справедливо для фаз, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. При компоновке однофазных кабелей в одном криостате ситуация ухудшается радикально. Соседние фазы создают перпендикулярную к плоскости лент составляющую магнитного поля, за счет чего потери могут вырасти более чем на порядок. Кроме того, магнитные поля фаз не будут компенсировать друг друга во внешнем пространстве, что приведет к появлению значительных потерь в окружающих конструктивных элементах. Поэтому для биполярного кабеля с фазами осесимметричного сечения целесообразно только их соосное расположение.

Поперечное сечение плоского кабеля представляет собой вытянутый прямоугольник. Слои ВТСП лент располагаются в плоскостях, параллельных длинной стороне прямоугольника. Также ориентированы расположенные между ними слои дополнительной меди и электроизоляции. В плоском униполярном кабеле велика составляющая магнитного поля, перпендикулярная к сверхпроводящему слою, поэтому потери в нем оказываются значительно выше (на порядок и более), чем в кабеле с аксиальной симметрией. Наличие перпендикулярной составляющей приводит также к снижению критической плотности тока и, следовательно, к увеличению расхода материала сверхпроводника. Однако в биполярном кабеле благодаря взаимодей-

ствию магнитных полей фаз перпендикулярная составляющая поля подавляется. В результате плоский кабель оказывается идентичным кабелю с аксиальной симметрией по условиям проникновения поля, а следовательно, и по значению потерь. В отношении некоторых других характеристик плоское сечение обладает преимуществами, поэтому представляется весьма целесообразным провести количественное сравнение обоих вариантов конструкции кабелей.

**Кабели многоугольного поперечного сечения.** Рассматриваемые варианты структур кабелей многоугольного сечения приведены в табл. 1. Номинальная толщина изоляции во всех конструкциях принята равной 2 мм, что соответствует рабочему напряжению 10 кВ. Каждая фаза содержит дополнительный (помимо омедненных слоев ВТСП лент) слой меди толщиной 1 мм. Эти слои предназначены, в первую очередь, для предотвращения перегрева кабеля в случае возникновения аварийного режима (в промежутке времени от начала аварии до момента срабатывания отключающих устройств). Поскольку внешние магнитные поля в бифилярных кабелях практически отсутствуют, структура окружающих кабель конструктивных элементов не конкретизируется, предполагается, что потерями в них можно пренебречь.

В несекционированном кабеле (Ph2RS2) внутренняя фаза  $A$  содержит 6 слоев лент. Диаметры внешнего  $D$  и внутреннего  $d$  слоев отличаются лишь на 1,2 мм. Этого недостаточно для варьирования числа лент, поэтому оно одинаково во всех слоях  $n_L = 20$ . При этом изменение зазора между лентами в слое остается в допустимых с точки зрения минимизации потерь пределах  $\varepsilon = 1 \div 5\%$ . За счет слоя изоляции внутренний диаметр фазы  $B$  увеличился, поэтому удалось увеличить и число лент в слое фазы до 24. Соответственно, число слоев сократилось до пяти при том же общем числе лент (120) и допустимых значениях зазоров между лентами в слоях. В трехсекционном кабеле (Ph2RS3), как видно из строки «структура» в табл. 1, на две секции разделена только фаза  $A$ , в пятисекционном (Ph2RS5) фаза  $A$  содержит три секции, а фаза  $B$  – две. По мере увеличения числа секций усложняется задача оптимального распределения лент между ними. При этом, как будет видно из дальнейшего, необходимость такой оптимизации обусловлена не только условием минимизации зазоров между лентами. Более важно обеспечить оптимальное распределение тока между секциями. Для решения этих задач необходимо было варьировать внутренние диаметры кабелей, а в кабеле Ph2RS3 увеличить толщину изоляции относительно номинального значения.

Таблица 1

Тип кабеля	Структура кабеля; структура секций
Ph2RS2, $d=23,4, D=33,6$	$Cu1,0-A_1-in2-B_2-Cu1,0;$ $C_1 6 \times 20, C_2 5 \times 24$
Ph2RS3, $d=22,2, D=43,0$	$Cu0,5-A_1-in3,7-B_2-Cu1,0-B_2-$ $-in3,7-A_3-Cu0,5;$ $C_1 3 \times 18; C_2 2 \times 24 + 3 \times 24; C_3 2 \times 32$
*Ph2RS3, $d=22,2 D=36,6$	$Cu0,5-A_1-in2-B_2-Cu1,0-B_2-$ $-in2-A_3-Cu0,5;$ $C_1 3 \times 18, C_2 3 \times 20 + 3 \times 20, C_3 3 \times 22$
Ph2RS5 $d=27,4, D=49$	$Cu0,5-A_1-in2-B_2-Cu1,0-B_2-$ $-in2-A_3-in2-B_4-in2-A_5-Cu0,5;$ $C_1 1 \times 23,$ $C_2 1 \times 24 + 1 \times 26, C_3 2 \times 30, C_4 2 \times 35, C_5 1 \times 37$
*Ph2RS5, $d=16,4, D=38$	$Cu0,5-A_1-in2-B_2-Cu0,5-B_2-$ $-in2-A_3-in2-B_4-C_0,5-in2-A_5-Cu0,5;$ $C_1 2 \times 12,$ $C_2 1 \times 16 + 2 \times 16, C_3 3 \times 18, C_4 2 \times 24 + 1 \times 24,$ $C_5 2 \times 21$

Примечание: маркировка: Ph (число фаз), R (осесимметричное сечение), S (число секций  $S=2$  – несекционированный кабель), \* – кабели неоптимизированной структуры;

общая структура кабеля (от внутренних слоев к внешним):  $Cu \langle xx \rangle$  – толщина дополнительного слоя меди, мм,  $A_i, B_i$  – фаза слоя,  $i$  – номер секции,  $in \langle xx \rangle$  – толщина слоя изоляции, мм;

структура секции:  $C_i$  (секция с номером  $i$ ),  $n_S \times n_L$  (число слоев лент на число лент в слое). Если между слоями лент секции расположена дополнительная медь, то записывается сумма  $n_S \times n_L$  (в направлении от внутренних слоев к внешним).

Результаты расчета гистерезисных потерь в кабелях табл. 1 приведены на рис. 3. В секционированных кабелях проникновение магнитного поля начинается с границ между секциями. Поэтому в трехсекционном кабеле амплитуда колебаний поля на периметрах секций уменьшается вдвое по сравнению с несекционированным вариантом. Поскольку значение потерь пропорционально кубу амплитуды, то в трехсекционном кабеле потери, рассчитанные в приближении композита, должны быть меньше в 4 раза. По тем же соображениям потери в пятисекционном кабеле должны уменьшиться в 25 раз. Однако из рис. 3 видно, что фактическая эффективность секционирования оптимизированных кабелей несколько ниже теоретических значений при  $I$ , близких к единице, и значительно лучше при малых амплитудах. Причина состоит в обсуждавшемся ранее эффекте уменьшения потерь, благодаря разнице между толщиной сверхпроводящего слоя и толщиной ленты. Этот же эффект значительного изменения  $dQ^*/dI$  наблюдается

и в несекционированном кабеле при  $I < 0,2$ , поскольку при значениях амплитуд такого порядка ток занимает не более двух слоев лент.

В секционированных кабелях число слоев в секциях меньше, и влияние эффекта распространяется на область больших значений  $I$ , которая уже представляет практический интерес. Причина ухудшения ситуации при  $I$ , близких к единице, в неравномерности распределения тока между секциями. Сумма потерь в секциях фазы пропорциональна сумме значений их токов в кубе, в то время как ток фазы равен сумме первых степеней  $I$ . Ясно, что сумма токов в кубе, а значит и потери, будут минимальны только при условии равенства токов в лентах секций.

Важность этого фактора иллюстрируется на рис. 3 результатами расчета потерь в неоптимизированных кабелях \*Ph2RS3 и \*Ph2RS5. Основная причина значительного увеличения потерь в них состоит именно в неравномерности распределения токов по секциям. Рост потерь становится катастрофическим, когда ток одной из секций достигает критического значения (в этих кабелях критическое значение достигается во внутренних секциях фаз  $A$  при  $I \approx 0,9$ ). С этого момента увеличение потерь способно полностью нивелировать эффект секционирования. Задача идеального согласования токов секций при одновременной минимизации зазоров между лентами и естественных ограниче-

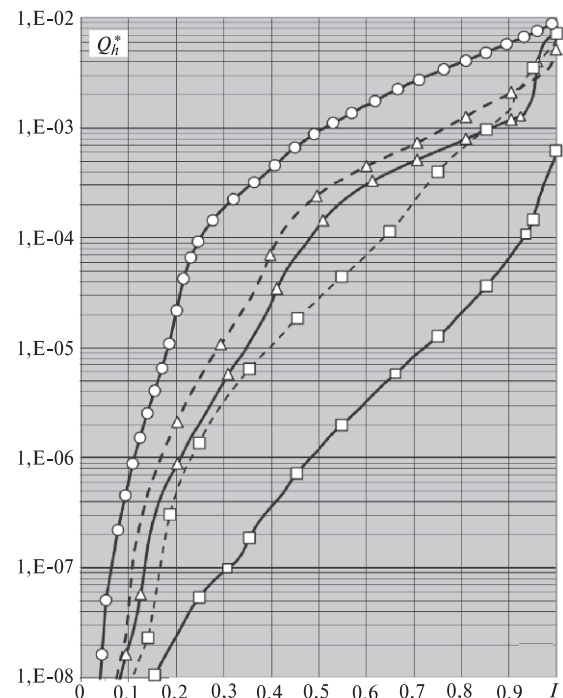


Рис. 3. Безразмерные гистерезисные потери за цикл изменения тока в кабелях многоугольного поперечного сечения:  $Q_h^* = Q_h / (\mu_0 J_C^2)$ ;  $J_C$  – критический ток кабеля; сплошные линии – оптимизированные кабели:  $\circ$ ,  $\Delta$ ,  $\square$  – соответственно, несекционированные, трехсекционные и пятисекционные; штриховые линии – неоптимизированные кабели:  $\Delta$ ,  $\square$  – соответственно, трехсекционные и пятисекционные

ниях по габаритам конструкции практически неразрешима. Однако сдвинуть зону существенного роста потерь за пределы рабочей области изменения  $I$  возможно. Обычно номинальные значения  $I$  не превышают 0,9. При этом условии с помощью точных вариантов расчетов можно получить конструкцию, в которой эффект секционирования реализуется в полной мере.

Результаты расчета матричных потерь приведены на рис. 4. Теоретически матричные потери — это сумма потерь на вихревые токи во всех несверхпроводящих компонентах кабеля. Однако электропроводность хастеллоя в 400 раз меньше электропроводности меди, а остальные составляющие имеют значительно меньшую толщину. Поэтому матричные потери практически равны потерям в меди. Задача их минимизации состоит в выборе оптимального расположения дополнительных слоев меди, поскольку их толщина значительно больше толщины слоев омеднения лент.

В несекционированном кабеле оптимальное расположение очевидно — на внутреннем периметре секции А и на внешнем периметре секции В, поскольку здесь переменное магнитное поле практически отсутствует. При таком расположении потери в дополнительных слоях меди становятся значительно меньше потерь в слоях омеднения лент. При расположении дополнительных слоев в секциях секционированных кабелей должен соблюдаться тот же принцип — использовать зоны, в которых

амплитуда изменяющегося магнитного поля минимальна.

В целом задача минимизации матричных потерь может решаться с меньшей точностью, поскольку, как видно из рис. 4, они значительно меньше гистерезисных. Заметим, однако, что в случае грубого нарушения принципа расположения дополнительных слоев меди ситуация может измениться на противоположную. Например, в варианте расположения их между фазами несекционированного кабеля матричные потери превысят гистерезисные.

**Плоские сверхпроводящие кабели.** Варианты конструкций несекционированных и секционированных плоских кабелей приведены в табл. 2. Для удобства сравнения результатов токнесущая способность кабелей сохранена такой же, как и кабелей предыдущего раздела — по 120 ВТСП лент на фазу. При плоском варианте исполнения все слои ВТСП лент имеют одинаковые размеры. Поэтому равенство критических значений токов фаз и зазоров между лентами обеспечивается автоматически. Благодаря симметричному расположению секций нет необходимости согласования токов секций в секционированных кабелях.

Результаты расчёта потерь в плоских кабелях сопоставлены с данными по потерям в кабелях многоугольного сечения на рис. 5 (комментарии по поводу используемых координат даны в следующем разделе статьи). Как видим, потери в несекционированном плоском кабеле приблизительно вдвое ниже, чем в кабеле с осесимметричным поперечным сечением. Это означает, что влияние перпендикулярной составляющей поля несущественно и с избытком компенсируется снижением потерь, обусловленным уменьшением числа слоёв лент (по 4 слоя на фазу против 5–6 для кабелей в предыдущем разделе). В абсолютных цифрах лучшие результаты показывают и секционированные плоские кабели (за исключением области малых значений  $I$  для пятисекционного кабеля). Эффективность секционирования, определяемая как отношение потерь в несекционированном и секционированных вариантах, в основном несколько ниже в устройствах с плоским сечением. Однако во всех случаях это отношение остаётся выше, чем оценка, полученная на основе приближения композита. С уменьшением  $I$  отношение растёт, как и у кабелей осесимметричного сечения. Однако в случае плоских кабелей этот рост более плавный. Кроме того, благодаря идеальному согласованию токов секций отсутствует аномальный рост потерь при значениях токов, близких к критическим. Поэтому эффективность секционирования остаётся высокой вплоть до  $I=1$ . Все сказанное в предыдущем разделе относительно выбора оптимального расположения сло-

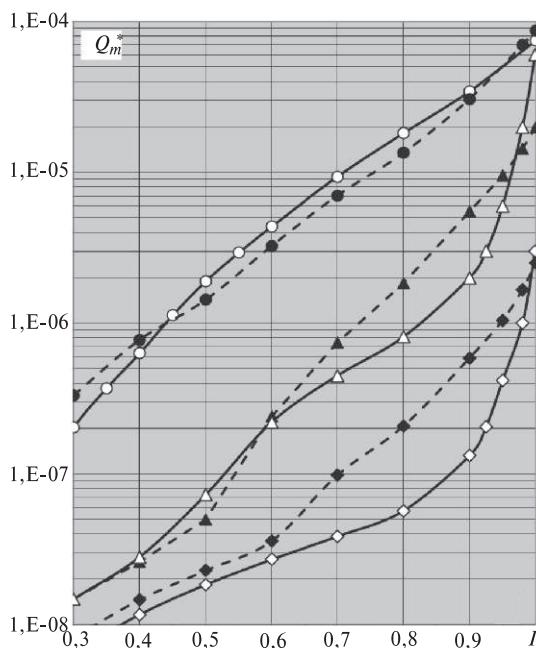


Рис. 4. Безразмерные матричные потери за цикл изменения тока в оптимизированных кабелях:  $Q_m^* = Q_m / (\mu_0 J_C^2)$ ;  $J_C$  — критический ток кабеля; сплошные линии и штриховые, соответственно, кабели многоугольного и плоского сечения; O, Δ, □ — соответственно, несекционированные, трехсекционные и пятисекционные кабели

ев дополнительной меди остается справедливым и для плоских кабелей. Все они оптимизированы по расположению этих слоев, а потери пренебрежимо малы по сравнению с гистерезисными (см. рис. 4).

Таблица 2

Тип кабеля	Структура кабеля; структура секций
Ph2FS2, $d=4,8$	Cu1,0-A <sub>1</sub> -in2-B <sub>2</sub> -Cu1; C <sub>1</sub> 4×30, C <sub>2</sub> 4×30
Ph2FS3, $d=6,8$	Cu0,5-A <sub>1</sub> -in2-B <sub>2</sub> -Cu1,0-B <sub>2</sub> - -n2-A <sub>3</sub> -Cu0,5; C <sub>1</sub> 2×30, C <sub>2</sub> 2×30+2×30, C <sub>3</sub> 2×30
Ph2FS5, $d=10,8$	Cu0,5-A <sub>1</sub> -in <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> -Cu0,5-B <sub>2</sub> - -in2-A <sub>3</sub> -in2-B <sub>4</sub> -Cu0,5-B <sub>4</sub> -in2-A <sub>5</sub> -Cu0,5; C <sub>1</sub> 1×30, C <sub>2</sub> 1×30+1×30, C <sub>3</sub> 2×30, C <sub>4</sub> 1×30+ +1×30, C <sub>5</sub> 1×30

**Примечание:** все кабели состоят из чередующихся слоев ВТСП лент, слоев дополнительной меди и слоев изоляции; для всех кабелей одинаковы: число лент в слое – 30, суммарное число слоев лент в фазе – 4, высота кабеля  $H=123$  мм; структуры кабеля и секций записаны в формате, аналогичном табл. 1, – в направлении слева направо;  $d$  – толщина кабеля.

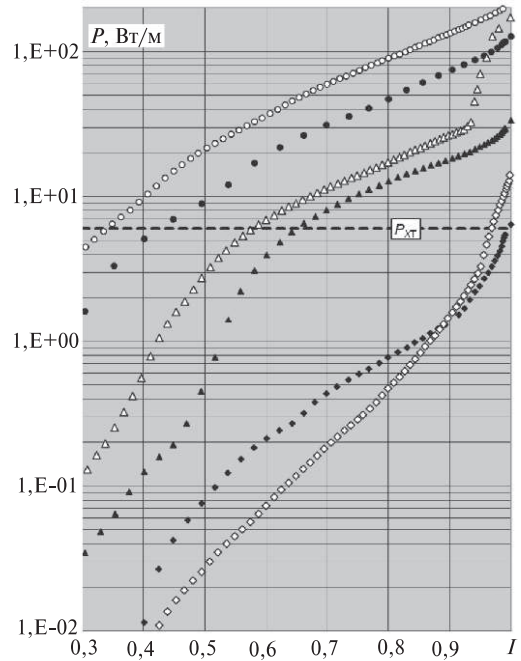
Помимо удобства оптимизации конструкции плоские кабели обладают и рядом других преимуществ. В частности, имеют лучшие условия охлаждения фаз, меньшие объем и массу, а также радиусгиба. В принципе, плоские кабели могут вообще формироваться из одинаковых плоских модулей, каждый из которых является фазой или секцией фазы.

Технология изготовления плоских кабелей пока не разработана. Кроме того, степень компенсации перпендикулярной составляющей магнитного поля на торцах бифилярной конструкции убывает по мере увеличения соотношения  $d/H$ . Это снижает эффективность использования плоских кабелей при большой толщине изоляции. Тем не менее, преимущества, перечисленные выше, в ряде случаев могут оказаться более важными.

**Общий анализ результатов.** До сих пор результаты расчетов представлялись в виде, не зависящем от критического значения тока лент. В этом разделе представлены результаты сравнительных расчетов по фактическим затратам мощности на компенсацию потерь. С учетом возможного перегрева лент и влияния собственного магнитного поля кабеля зададимся значением критического тока лент  $J_{CL}=50$  А рассчитаем мощность (Вт/м):

$$P = \mu_0 J_C^2 (Q_h^* + Q_m^*) k_x f, \quad (2)$$

где  $J_C=6$  кА – критическое значение тока кабеля;  $Q_h^*$  и  $Q_m^*$  – безразмерные гистерезисные и матрич-



**Рис. 5.** Затраты мощности на компенсацию потерь в оптимизированных кабелях многоугольного сечения (светлые маркеры) и плоских кабелях (темные маркеры); O, Δ, □ – соответственно несекционированные, трехсекционные и пятисекционные кабели

ные потери за цикл изменения тока,  $k_x=10$  – холодильный коэффициент;  $f=50$  Гц; результаты представлены на рис. 5.

Значение  $P$  по отношению к передаваемой линией мощности незначительно для всех кабелей. С точки зрения капитальных затрат на создание системы охлаждения логичнее сравнивать результаты с затратами мощности на компенсацию естественных тепловых потерь из криостата. Последние, вообще говоря, зависят от размера и формы криостата и, следовательно, от размеров сечения кабеля. Однако для общей оценки точное значение несущественно, поэтому для всех вариантов оно принято одинаковым  $P_{хт}=6$  Вт/м. Потери в кабелях всех конструкций уменьшаются с уменьшением  $I$  и в любом кабеле достигают области  $P < P_{хт}$ . Однако такой путь снижения потерь не улучшит экономические характеристики, поскольку сопряжен с увеличением расхода материала сверхпроводника. Оправдано лишь вынужденное снижение значения  $I$  в соответствии с требованиями устойчивости кабеля к перегрузкам электрической сети. Обычно в зависимости от конкретной ситуации эти требования определяют номинальные значения  $I$  в диапазоне от 0,5 до 0,9. Как видно из рис. 5, в этом диапазоне значения  $P$  для несекционированных устройств могут превышать  $P_{хт}$  на порядок и более, что ведёт к существенному удорожанию системы охлаждения.

Радикальный путь снижения потерь – секционирование. Уже для трёхсекционного устройства значения  $P$  становятся приемлемыми. Зависимости

для устройств из пяти секций расположены значительно ниже уровня  $P = P_{\text{XT}}$  во всём рабочем диапазоне изменения  $I$ . Дальнейшее уменьшение потерь практически не повлияет на общие энергетические затраты. Следовательно, вариант разбиения кабеля на пять секций можно признать оптимальным. Увеличение числа секций может оказаться целесообразным только для кабелей со значительно более высоким значением критического тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Д.Ф., Ахметгереев М.Р., Будовский А.И., Бунин Р.А., Волошин И.Ф., Евсин Д.В., Иванов В.П., Сидоров В.А., Фишер Л.М., Цхай Е.В. Сверхпроводниковый ограничитель переменного и постоянного тока. — *Электричество*, 2012, №9, с. 12–22.
2. Kopylov S.I., Balashov N.N., Zheltov V.V., Krivetsky I.V., and Sytnikov V.E. The Effect of Sectioning on the Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiter. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, June 2015, vol.25, No.3.
3. Желтов В.В., Кривицкий И.В. Ограничители токов короткого замыкания для линии 127 кВ, 2 кА. — *Сверхпроводимость: исследования и разработки*, 2013, № 16–17, с. 105–108.
4. Xudong Wang, Atsuchi Ishiyama et. al. Over-Current Characteristics of 66-kV Re123HTS Power Cable. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1013–1016.
5. Masashi Yagi, Jin Liu et. al. Experimental Results of 275-kV 3kA REBCO HTS Power Cable. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, No. 3.

6. Желтов В.В. Программа расчета проникновения поля в линейные и кольцевые сверхпроводники. — *Электричество*, 2009, No. 7, с. 61–67.

7. Желтов В.В. Аналитический расчет электротехнических характеристик прямолинейных сверхпроводников: смешанное возбуждение при преобладающем влиянии источника питания. — *Электротехника*, 2008, № 3, с. 51–59.

[15.08.2016]

*Авторы: Желтов Владимир Валентинович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1971 г. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гистерезисные потери в сверхпроводниках». Старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур (ОИВТ) РАН.*

*Копылов Сергей Игоревич окончил МЭИ в 1979 г. Доктор технических наук, зав. лабораторией ОИВТ РАН.*

*Копылова Любовь Николаевна окончила МЭИ в 1982 г. Доцент кафедры инженерной экологии и охраны труда МЭИ.*

*Липа Дмитрий Алексеевич окончил магистратуру в Российском государственном аграрном заочном университете (РГАЗУ) в 2015 г. Ассистент кафедры электрооборудования и автоматики РГАЗУ.*

*Попова Мария Вячеславовна окончила РГАЗУ в 2003 г. В 2012 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка и обоснование параметров токоограничивающих устройств для систем сельского электроснабжения». Доцент кафедры электрооборудования и автоматики РГАЗУ.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 12, pp. 27–33.*

## The Effect of Segmentation on the Losses in AC Devices Containing Bifilar HTSC Coils

ZHELTOV Vladimir Valentinovich (Unified Institute of High Temperature of Russian Academy of Sciences (UIHT RAS), Moscow, Russia) — Senior scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)

KOPYLOV Sergey Igorevich (UIHT RAS, Moscow, Russia) — Head of the Laboratory, Dr. Sci. (Eng.)

KOPYLOVA Lyubov' Nikolayevna (National Researcher University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) — Associate Professor

Lipa Dmitrii Alekseyevich (Russian State Agrarian Correspondence University (RSACU), Moscow Russia) — Assistant in the Department

POPOVA Mariya Vyacheslavovna (RSACU, Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*Resistor-type superconducting current limiters, layer-wise windings of transformer-type current limiters, superconducting three-phase high-voltage cables having phases shielded by a superconductor, etc. may serve as examples of using bifilar A coils. Results from calculations of hysteresis and matrix losses in non-segmented and segmented bipolar AC cables are presented. Cables with axially symmetrical and flat cross sections are considered. It is shown that segmenting is an efficient way of reducing losses for cables of both designs.*

Key words: cables, bifilar coils, losses, segmentation

## REFERENCES

1. Alferov D.F., Akhmetgerreyev M.R., Budovskii A.I., Bunin R.A., Voloshin I.F., Yeysin D.V., Ivanov V.P., Sidorov V.A., Fisher L.M., Tskhai Ye.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 9, pp. 12–22.
2. Kopylov S.I., Balashov N.N., Zheltov V.V., Krivetsky I.V., and Sytnikov V.E. The Effect of Sectioning on the Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiter. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, June 2015, vol.25, No.3.
3. Zheltov V.V., Krivitskii I.V. *Sverkhprovodimost': issledovaniya i razrabotki — in Russ. (Superconductivity: research and development)*, 2013, No. 16–17, pp. 105–108.

4. Xudong Wang, Atsuchi Ishiyama et. al. Over-Current Characteristics of 66-kV Re123HTS Power Cable. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol.21, No.3, pp. 1013–1016.

5. Masashi Yagi, Jin Liu et. al. Experimental Results of 275-kV 3kA REBCO HTS Power Cable. — *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, No.3.

6. Zheltov V.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 7, pp. 61–67.

7. Zheltov V.V. *Elektrotehnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2008, No. 3, pp. 51–59.