

**Анисимов Г. Н., Колесова А. В., Саттаров Р. Р.**  
**G. N. Anisimov, A. V. Kolesova, R. R. Sattarov**

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ  
ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

**THE INFLUENCE OF VARIABLE MAGNETIC FIELDS ON SUPERCONDUCTING  
ELECTRIC MACHINE WINDING**

**Анисимов Геннадий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Mr. Gennady N. Anisimov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical foundations of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Колесова Анна Владимировна** – старший преподаватель кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Ms. Anna V. Kolesova** – senior lecturer, Electromechanical complexes and systems Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Саттаров Ринат Рашитович** – заведующий лабораторией кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Mr. Renat R. Sattarov** – head of laboratory, Electromechanical complexes and systems Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Аннотация.** Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований потерь мощности в сверхпроводящих обмотках возбуждения (СПОВ) электрических машин от воздействия пульсирующего и вращающегося магнитных полей. Описываются методики расчета потерь в сверхпроводниках и методика определения допустимых электромагнитных воздействий на сверхпроводящие обмотки в динамичных режимах. Приводятся основные расчетные соотношения для определения потерь энергии в сверхпроводящих обмотках путем суммирования гистерезисных, вихревых и кооперативных потерь в элементах объема СПОВ с учётом распределения магнитного поля по ее сечению. Рассматриваются вопросы устойчивости работы СПОВ с учетом допустимых уровней индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ в широком диапазоне частот. Приводятся результаты экспериментального исследования СПОВ, изготовленных из промышленных ниобий-титановых и ниобий-оловянных проводников, при изменении частоты воздействующего поля и значений рабочего тока. Проводится теоретический анализ процессов диссипации энергии при воздействии на СПОВ вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля при наличии постоянного поля подмагничивания с индукцией до 2 Тл.

**Summary.** The results of theoretical and experimental studies of power losses in superconducting excitation windings of (SPOV) electrical machines from the effects of pulsating and rotating magnetic fields are presented in the article. The authors describe the methods of loss calculation in superconductors as well as the method of determining allowable electromagnetic radiation on a superconducting winding in dynamic modes. The article provides basic design calculations to determine the energy losses in the superconducting windings by summing the hysteresis, eddy and co-operative losses in the elements of volume SPOV taking into account the distribution of the magnetic field in its cross-section. The stability of the SPOV concerning acceptable levels of induction of an alternating magnetic field acting on the SCEW in a wide range of frequencies is focused on. The results of experimental studies SPOV made with the help of industrial niobium-titanium and niobium-tin conductors at change of incident field frequency and values of operating current are given. The authors present a theoretical analysis of the processes of energy dissipation when exposed to SPOV rotating with a frequency of 50 Hz magnetic field with a permanent bias field with induction up to 2 T.

**Ключевые слова:** сверхпроводящая обмотка, пульсирующее магнитное поле, вращающееся магнитное поле, температура, частота, потери на вихревые токи, потери на гистерезис, кооперативные потери.

**Key words:** superconducting winding, a pulsing magnetic field, rotating magnetic field, temperature, frequency, eddy currents losses, hysteresis losses, cooperative losses.

УДК 533.9

### Введение

Эксплуатация электрической машины переменного тока со сверхпроводящей обмоткой возбуждения (СПОВ), а также в СПОВ, использующихся в высокоскоростных транспортных системах с тяговым линейным синхронным двигателем и магнитным подвесом экипажа [1 – 3] и в системах специального назначения [4; 5], предполагает возникновение переходных процессов, сопровождающихся возникновением экстратов в контурах машины. В современных сверхпроводящих материалах, используемых при создании электромашинных обмоток возбуждения, под воздействием изменяющихся (пульсирующих, вращающихся) магнитных полей возникают потери энергии, которые выливаются в тепловыделение, которое способно при определенных условиях вызвать переход сверхпроводника в нормальное состояние. Особенности электрической машины с СПОВ определяют специфические требования к характеру протекания переходных процессов: величина и скорость изменения тока возбуждения и магнитного поля, воздействующего на СПОВ стороны статора, не должны превышать критические значения для данного сверхпроводника. Так как критический ток сверхпроводника весьма зависит от температуры, при выборе критериев допустимой скорости и величины изменения поля в области СПОВ требуется учитывать количество тепловой энергии, выделившейся в результате возникновения переходного процесса, и связанное с ним увеличение температуры сверхпроводника. К наиболее часто встречающимся ситуациям, связанным с изменениями тока и поля возбуждения, относятся короткие замыкания в цепи якоря, сброс и наброс нагрузки, режимное регулирование. Также следует учитывать случаи, когда на СПОВ воздействует постоянно изменяющееся магнитное поле из-за несимметричной нагрузки [6 – 11].

**Исследование потерь энергии в СПОВ при воздействии пульсирующего магнитного поля.** Рассмотрим катушечные обмотки (различной геометрии), выполненные из сверхпроводящих композиционных проводов, подвергающиеся воздействию переменного магнитного поля.

Имеется два основных механизма потерь, один из которых обусловлен протеканием переменного транспортного тока по сверхпроводнику, другой связан с тем, что каждый виток катушки находится в сильном магнитном поле, создаваемом другими витками. Для многослойных катушек превалирует второй механизм потерь.

В основе расчёта потерь в композиционном проводе от пульсирующего магнитного поля амплитуды  $B_0$  была эмпирическая зависимость вида

$$Q = \alpha B_0^{2+\beta},$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметры сверхпроводника, определяемые на основании результатов экспериментальных калориметрических измерений.

Потери энергии в сверхпроводящих обмотках находились путём суммирования потерь в элементах объёма СПОВ с учётом распределения магнитного поля по ее сечению.

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка, в которой магнитное поле, воздействующее на СПОВ, создавалось двумя обмотками: обмоткой постоянного магнитного поля и обмоткой переменного поля. Последняя имела две модификации: обмотка пульсирующего поля и обмотка вращающегося поля. Постоянное магнитное поле достигало значения 3 Тл, а амплитуда переменного поля – 0,1 Тл.

Потери в композиционном сверхпроводящем проводе от воздействия переменного магнитного поля измерялись калориметрическим способом, а потери в сверхпроводящих катушках, несущих переменный транспортный ток, измерялись электрическим методом.

Наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных данных наблюдалось в случае однослойных обмоток. По мере увеличения количества слоёв в СПОВ расхождение между расчётом и экспериментом увеличивалось.

На рис. 1 приведён пример экспериментальной и теоретической зависимостей потерь мощности от амплитуды пульсирующего магнитного поля, изменяющегося с частотой 50 Гц, для однослойной катушки из сверхпроводящего композиционного провода HT-50, диаметром 0,5 мм с числом жил – 210. Геометрические размеры катушки: внутренний радиус намотки – 10 мм, высота намотки – 80 мм.

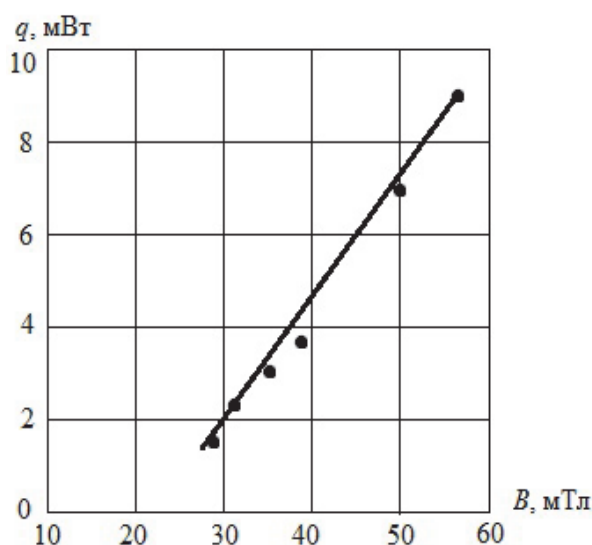


Рис. 1. Потери мощности в сверхпроводящей катушке в переменном магнитном поле: ■ – эксперимент; — – расчёт

Также экспериментально исследовалось влияние поперечного магнитного поля на величину гистерезисных потерь в ленточном проводе из  $Nb_3Sn$  в переменном магнитном поле. Для измерения потерь использовался вибрационный магнитометр с колеблющимся образцом. Постоянный и переменный компоненты магнитного поля были ориентированы в плоскости ленты. Переменное поле  $h_0 \sin \omega t$  было направлено вдоль длины ленты, а постоянное поле  $H_0$  – поперёк её длины. Было установлено, что постоянное поперечное магнитное поле приводит к увеличению гистерезисных потерь. Немаловажное значение для величины гистерезисных потерь имела магнитная предыстория ленточного провода из  $Nb_3Sn$ .

**Исследование устойчивости сверхпроводящих обмоток к воздействию переменного магнитного поля.** Для устойчивости работы СПОВ требуется знать допустимые уровни индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ в широком диапазоне частот. Другими словами, необходим обоснованный выбор значений рабочего тока и формулировка требований к системе экранирования СПОВ.

Допустим, что сверхпроводящая обмотка возбуждения представляет собой монолитную конструкцию, охлаждение которой осуществляется с поверхности обмотки за счёт теплопроводности. Распределение температуры по сечению обмотки определяется в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q = 0,$$

где  $T = f(x, y, z, t)$  – температура точки обмотки с координатами  $x, y, z$ ;  $K_x, K_y$  – коэффициенты теплопроводности;  $q$  – удельная мощность тепловыделения в обмотке

$$q = \lambda \cdot (q_r + q_v + q_k),$$

где  $\lambda$  – коэффициент заполнения обмотки проводом;  $q_r, q_v, q_k$  – удельные гистерезисные, вихревые, кооперативные потери в проводе.

Граничные условия, определяющие теплообмен на поверхности обмотки, следующие:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_\Gamma} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_\Gamma} = \frac{h_\Gamma}{K_u} (T_\Gamma - T_0),$$

где  $x_\Gamma, y_\Gamma$  – координаты границы;  $T_\Gamma$  – температура границы;  $T_0$  – температура хладагента 4,2 К;  $K_u$  – коэффициент теплопроводности поверхностной изоляции;  $h_\Gamma$  – коэффициент теплоотдачи на границе, который определяется по формуле [2]

$$h_\Gamma = \frac{hK_u}{K_u + \delta h},$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи при кипении жидкого гелия;  $\delta$  – толщина изоляции.

Условие устойчивости СПОВ определяется не превышением плотности тока по сверхпроводнику ее критического значения ( $j_k$ ) с учётом локального значения магнитной индукции и температуры

$$\frac{I}{S_{СП}} < j_k(B, T),$$

где  $I$  – ток СПОВ;  $S_{СП}$  – сечение сверхпроводника в проводе.

Критическая плотность тока определяется на основании модели критического состояния с учётом температурной зависимости [3]

$$j_k = \frac{\alpha [T_k (1 - B \cdot B_{k2}^{-1})^{0,5} - T]}{(B_0 + B) [T_k (1 - B \cdot B_{k2}^{-1})^{0,5} - T_0]},$$

где  $\alpha, B_0$  – константы модели;  $T_k$  – критическая температура;  $B_{k2}$  – верхнее критическое поле.

Расчёт тепловыделения в обмотке проводился в соответствии с выражениями, полученными в работе [4].

Гистерезисные потери от поля с амплитудным значением напряженности  $H_m$  и частотой  $f$  определялись по формулам

$$q_\Gamma = \frac{256 \lambda \mu_0 H_m^3 f}{27 \pi d j_k}, \quad H_m < H_p < j_k \frac{d}{2},$$

$$q_\Gamma = \frac{2 \lambda \mu_0 d H_m j_k f}{3}, \quad H_m \geq H_p,$$

где  $H_p$  – поле полного проникновения в сверхпроводник.

Потери на вихревые токи рассчитывались по соотношению

$$q_e = \frac{(\pi R_0 \mu_0 H_m f)^2}{8 p_m(B)},$$

где  $R_0$  – радиус провода без изоляции.

Кооперативные потери находились в соответствии с выражениями, полученными в работе [4], в зависимости от частоты и амплитуды воздействующего переменного магнитного поля

$$q_{\dot{E}} = \frac{\mu_0^2(1-\lambda)^2 H_m^2 l_T^2 f^2}{4p_m}, \quad f < f_1, H_m < H_p,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{\mu_0^2(1+\lambda)H_m^2 l_T^2 f^2}{(1-\lambda)p_m}, \quad f < f_1, H_m \geq H_p,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{8\pi^2(1-\lambda)^2 H_m^2 p_m l_T^2}{(1+\lambda)l_T^2}, \quad f \leq f_1 \leq f_2,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{8\pi^2(1-\lambda)R_0 \sqrt{\pi\mu_0} f p_m H_m^2}{(1+\lambda)l_T^2}, \quad f > f_1,$$

где  $f_1 = \left(\frac{2\pi}{l_T}\right)^2 \frac{p_m}{\pi\mu_0}$ ,  $f_2 = \frac{p_m}{2R_0^2 \pi\mu_0}$ ,  $p_m = \frac{1}{\sigma_{\text{ПР}} \mu_{\text{ПР}}}$  – удельная проводимость и относительная магнитная проницаемость в направлении, перпендикулярном сверхпроводящим жилам;  $l_T$  – шаг твиста.

Совокупность приведенных выражений позволила определить зависимость амплитуды индукции переменного магнитного поля от частоты, вызывающей переход СПОВ в нормальное состояние.

Расчётные зависимости теплоотода и тепловыделения для центрального сечения представлены на рис. 2.

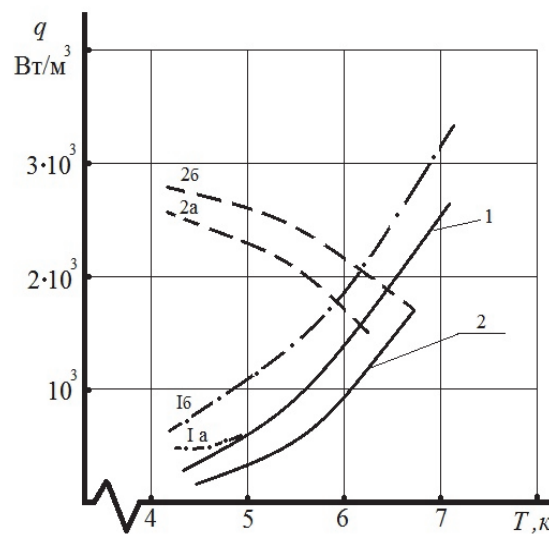


Рис. 2. Потери и теплоотвод для центрального сечения обмотки:

- 1, 2 – теплоотвод из обмоток 1, 2; 1а – потери в обмотке 1 при  $I = 75 \text{ А}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $B_m = 0,015 \text{ Тл}$ ; 1б –  $B_m = 0,02 \text{ Тл}$ ;
- 2а – потери в обмотке 2 при  $I = 800 \text{ А}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $B_m = 0,015 \text{ Тл}$

Экспериментальное исследование устойчивости СПОВ, изготовленных из промышленных ниобий-титановых и ниобий-оловянных проводов, проводилось в диапазонах частоты воздействующего поля от 2 до 50 Гц и значений рабочего тока СПОВ от 0,5 до 0,99  $I_k$ . Сверхпроводящая обмотка, предварительно запитанная постоянным током, подвергалась воздействию переменного магнитного поля. В ходе эксперимента определялась зависимость времени воздействия переменного магнитного поля на обмотку до перехода её в нормальное состояние в зависимости от амплитуды индукции. Эксперименты проводились для разных значений, рабочего тока и частоты пере-

менного поля. На основании этих результатов получено минимальное критическое значение амплитуды индукции для СПОВ, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сверхпроводящих обмоток

Название параметров	Обмотка 1	Обмотка 2
Размеры, мм	360×190×30	350×120×37
Сечение обмотки, мм	80×30	40×37
Количество секций	1	2
Количество витков	3000	350 (230 ÷ 120)
Компаунд	Эпоксидный с наполнителем	Эпоксидный без наполнителя
Материал провода / матрицы	NbTi / медь	Nb <sub>3</sub> Sn / бронза
Диаметр, мм	0,85	1,26
Количество жил	37	7225
Диаметр жил, мкм	90	5
Шаг скрутки, мм	25	25

В результате экспериментальных исследований были определены зависимости уровня критического амплитудного значения индукции от частоты для различных значений тока обмотки (см. рис. 3). Эксперименты показали высокую повторяемость результатов для идентичных обмоток и удовлетворительное совпадение с расчётными данными.

Выполненное экспериментальное сравнение однотипных обмоток, изготовленных из ниобий-титанового и ниобий-оловянного круглых проводов, показало, что использование последнего позволяет примерно на порядок повысить допустимый уровень индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ.

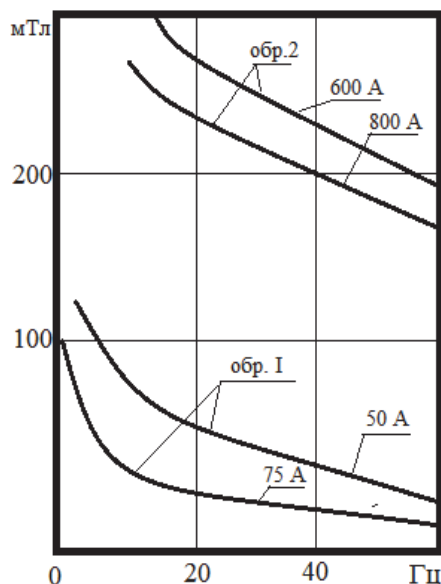


Рис. 3. Зависимость критической индукции переменного поля

**Исследование потерь энергии в сверхпроводниках при работе во вращающемся магнитном поле.** Рассмотрим процесс диссипации энергии в СПОВ при воздействии на них вращающегося магнитного поля величиной до 0,05 Тл при наличии постоянного поля подмагничива-

ния с индукцией до 2 Тл. Полученные экспериментальные зависимости полных потерь мощности в сверхпроводящих образцах при воздействии на них вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля приведены на рис. 4. Данные исследованных образцов приведены в табл. 2.

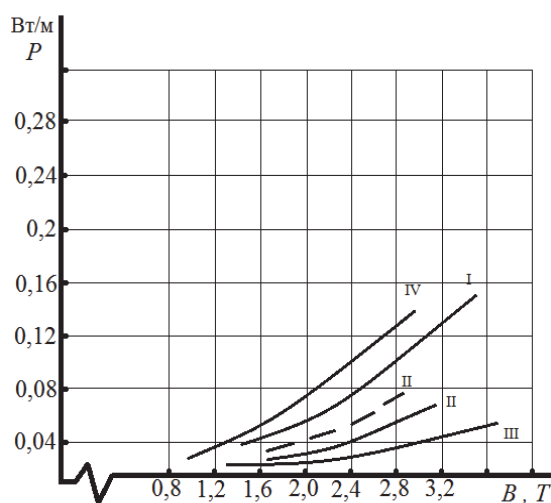


Рис. 4. Зависимость потерь мощности в сверхпроводящих образцах от амплитуд внешнего вращающегося магнитного поля:  
 — эксперимент; - - - расчет

Таблица 2

Параметры сверхпроводящих образцов

Наименование параметров	Номер образца			
	I	II	III	IV
Размер провода, мм	Провод Ø1,5	Шина 2×3,5	Проволока Ø0,7	Шина 2×3,5
Материал матрицы	Медь	Медь – МН-5	Медь	Медь
Количество СП жил	1045	3630	61	3630
Коэффициент заполнения обмотки сверхпроводником	0,35	0,395	0,52	0,35
Высота образца, м	0,05	0,05	0,05	0,05
Число проводников в образце	58	138	372	138
Длина провода, м	2,9	6,9	18,6	6,9

Теоретическая оценка потерь мощности в сверхпроводнике от воздействия вращающегося магнитного поля выполнялась по следующей методике:

1) Поперечное вращающееся магнитное поле, приложенное к сверхпроводнику, представлялось в виде суммы двух взаимно перпендикулярных векторов

$$B_a = B_a^m \sin \omega t \cdot e_x + B_a^m \cos \omega t \cdot e_y,$$

где  $B_a^m$  – амплитуда внешнего поля;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $e_x, e_y$  – единичные орты.

2) Потери на гистерезис в сверхпроводящей жиле за цикл на единицу объема в случае неполного проникновения поля в сверхпроводящие жилы определялись по формуле [4], Дж/м<sup>3</sup>:

$$W_{h \text{ rot}} = \frac{4\pi}{3\mu_0} \lambda B_p f B^m [1 - \exp(-4\beta_f^2) - 8\beta_f^3 \exp(-4,75\beta_f)] \cdot \left(\frac{R}{R+C}\right),$$

где  $\beta_f = \frac{2B^m}{\mu_0 dj_c}$ ,  $B^m = \frac{\mu_1 B_a^m}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{0,5}}$ ,  $\mu_1 = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda}$ ;  $d$  – диаметр сверхпроводящей жилы;  $\lambda$  – коэффициент заполнения по сверхпроводнику  $\tau = \frac{\mu_0}{2} \left( \frac{l_T}{2\pi} \right)^2 (\sigma_{пр} + \frac{C}{R} \sigma_{поп})$ ;  $R$  – радиус композита;  $C$  – толщина наружной оболочки матрицы;  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_{поп}$  – проводимость в продольном и поперечном направлениях.

В случае полного проникновения магнитного поля в сверхпроводящие жилы гистерезисные потери в цилиндрической сверхпроводящей жиле определяются по формуле [6], Вт/м<sup>3</sup>:

$$P_h = \frac{4}{3} f dj_c B^m,$$

где  $f$  – частота изменения магнитного поля;  $j_c$  – критическая плотность тока.

Расчётная зависимость удельных гистерезисных потерь от величины поля подмагничивания для различных значений амплитуды вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля приведена на рис. 5. Результаты исследований показали, что вращательные гистерезисные потери  $\sim$  в 1,28 раза выше, чем потери на гистерезис в случае пульсирующего поля.

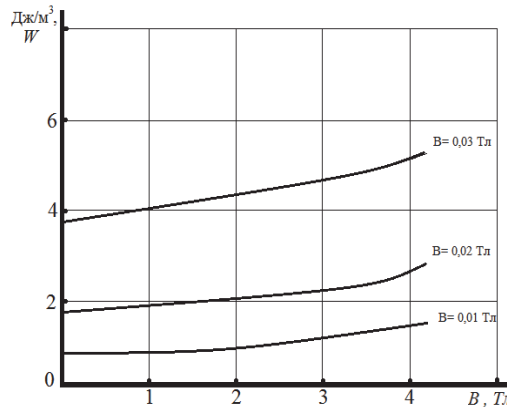


Рис. 5. Зависимость гистерезисных потерь мощности в образце II от величины поля подмагничивания

Если плотность потока экранирующего магнитного поля

$$B_s = B^m \omega \tau / (1 + \omega^2 \tau^2)^{0,5}$$

удовлетворяет следующему условию:

$$B_s \ll \frac{\mu_0 d j_c}{\pi} = B_p,$$

то потери на вихревые токи на единицу объёма определяются по следующему выражению [6]:

$$P_e = 2 \frac{B_a^m \omega^2 \tau}{\mu_1 (1 + \omega^2 \tau^2)}.$$

Если  $B_s > \mu_0 d j_c$ , то для расчета потерь на вихревые токи на единицу объёма использовалась следующая формула:

$$P_e = \frac{3\pi}{4} \frac{128 B_a^m \omega^4 \tau^3}{9\pi^3 \mu_1 B_p (1 + \omega^2 \tau^2)^{3/2}}.$$



По данной методике выполнен оценочный расчет потерь в сверхпроводящем образце II, данные которого приведены в табл. 2. Расчетные точки приведены на рис. 4.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что наибольшее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями, исследованных в диапазоне амплитуды вращающегося магнитного поля от 0,01 до 0,05 Тл, составляет 33 % и увеличивается по мере роста амплитуды воздействующего внешнего поля.

Следует отметить, что в исследованном диапазоне воздействующих полей и частот в сверхпроводящем образце преобладают потери на вихревые токи, а потери на гистерезис незначительны и составляют десятые доли процента.

### Выводы

1. На основе проведенных исследований предложена методика расчёта потерь энергии в  $Nb_3Sn$  сверхпроводниках от воздействия вращающегося магнитного поля.
2. Экспериментально исследовано влияние поперечного магнитного поля на гистерезисные потери в ленточном проводнике. Установлено, что поперечное магнитное поле вызывает рост гистерезисных потерь при всех значениях амплитуды магнитного поля.
3. Разработана методика расчёта распределения температуры в сверхпроводящей обмотке в режиме заведения тока, позволяющая определить максимальную скорость запитки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости / К. К. Ким. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. – 360 с.
2. Ким, К. К. Транспортная система с кондукционным подвесом при движении экипажа с малой скоростью / К. К. Ким // *Электротехника*. – 1998. – № 11. – С. 36-41.
3. Ким, К. К. Использование сверхпроводящего подвеса в транспортных системах / К. К. Ким // *Электротехника*. – 2000. – № 6. – С. 16-19.
4. Ким, К. К. Об одном способе автоматического причаливания космических аппаратов / К. К. Ким // *Космические исследования*. – 1996. – Т. 34(№ 1). – С. 1-4.
5. Ким, К. К. Об одном способе стыковки космических аппаратов / К. К. Ким // *Космические исследования*. – 2000. – Т. 38(№ 2). – С. 221-224.
6. Laskaris, T. E. Transient thermal analysis of epoxy-impregnated superconducting windings in linear ramped field / T. E. Laskaris // *Journal of Heat Transfer*. – 1978, 100. – № 4. – pp. 702-707.
7. Уильямс, Дж. Сверхпроводимость и ее применение в технике / Дж. Уильямс. – М.: Мир, 1973. – С. 135.
8. Carr, W. J. Alternating field loss in multifilamentary superconducting wire for weak AC field superposed on a constant bias / W. J. Carr, M. S. Walker, J. H. Murphy // *Journal Applied Physics*. – 1974, 46. – № 9. – pp. 4048-4052.
9. Pang, C. Losses in NbTi multifilamentary composite when exposed to transverse alternating and rotating field / C. Pang, A. M. Campbell, P. M. Laren // *IEEE Transaction on Magnetics*. – Vol-Mag-17. – № 1. – January, 1981.
10. Hlasnik, I. Could cryoturbogenerator armature winding be superconducting? / I. Hlasnik. – 03.05.01. June, 1982. Institute für Technishe Physik.
11. Иванов, С. Н. Некоторые вопросы использования сверхпроводящих обмоток возбуждения в режиме «замороженного» потока / С. Н. Иванов, И. Д. Лупкин // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1982. – С. 1344-1347.