

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р.техн.наук,
В.О. ИЛЬЧЕВА,
В.А. СЕРОШТАНОВ,
С.В. ШАРЫЙ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОКОВОДОВ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КЛЮЧЕЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ

Розглядаються можливості оптимального розміщення надпровідних (НП) ключів та тоководів для коротких ($L < R$) та довгих ($L > R$) НП соленоїдів, що необхідно для зменшення значень пондеромоторних сил та теплопідводів. Розраховано розподіл магнітного поля впродовж образуючої розрізу обмотки соленоїду з внутрішньою, боковою та зовнішньою поверхнями

Рассматриваются возможности оптимального размещения сверхпроводящих (СП) ключей и тоководов для коротких ($L < R$) и длинных ($L > R$) СП соленоидов, что необходимо для уменьшения величин пондеромоторных сил и теплоподводов. Расчитаны распределения магнитного поля вдоль образующей сечения обмотки соленоида с внутренней, боковой и внешней поверхностями.

Кроме своего прямого назначения в магнитной системе конкретной установки, СП-соленоиды являются реальным энергосберегающим средством, имеющим большую эффективность при их использовании в крупных магнитных системах, таких, в частности, как электромагнитные сепараторы элементов и изотопов [1-4], где энергия, идущая на создание магнитного поля, определяет стоимость выпускаемой продукции. Кроме собственно СП-магнита, в систему с длительным режимом эксплуатации входит ряд существенных по значению вспомогательных узлов, которыми в СП-системах являются тоководы и СП-ключи, позволяющие перевести их в короткозамкнутый режим или режим замороженного потока (что снижает теплоподводы по тоководам, и делает практически равными пульсации магнитного поля, что чрезвычайно важно в ряде применений, в частности в электромагнитных сепараторах изотопов). Снижение величин теплоподводов уменьшает соответственно и стоимость системы криообеспечения. Однако, это является только частью проблемы. Вторым существенным моментом являются величины пондеромоторных сил, действующих в областях, где размещаются эти "вспомогательные" элементы. Дело в том, что при использовании "сухих", замонтированных СП-обмоток (охлаждаемых "контактной теплопроводностью", а не помещенных в ванну с жидким гелием) с величинами плотности транспортного тока, превышающими $1 \cdot 10^4$ А/см², возникают проблемы прочности про-

водников, идущих по телу замоточной обмотки от внутренней и внешней ее частей к токовводам или распределительным устройствам, включающим контакты СП-ключей и токовводов. Эти вопросы приобретают большую значимость в многосекционных магнитных системах с индивидуальными токовводами [3]. Дополнительные вопросы появляются при включении в токоввод высокотемпературных (ВТСП) частей. Особое место в этих вопросах имеют вопросы электроизоляции, которые возникают при аварийном выводе энергии из соленоидов с большой запасенной энергией и высокой плотностью транспортного тока. Естественно, все перечисленное выше факторы можно существенно упростить при уменьшении величины магнитного поля. Поскольку эти устройства располагаются, как правило, с наружной части соленоида, представляет интерес оценить величины магнитных полей и топографию поля в области расположения этих узлов.

Расчеты магнитного поля соленоидов велись на основе закона Био-Саварра для витка с током (рис. 1) и сводились к вычислению интегралов:

$$H_x = IR^2 \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{r^3} - IyR \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha d\alpha}{r^3} \quad (1)$$

$$H_y = IxR \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha d\alpha}{r^3} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + R^2 - 2yr \cos \alpha} \quad (3)$$

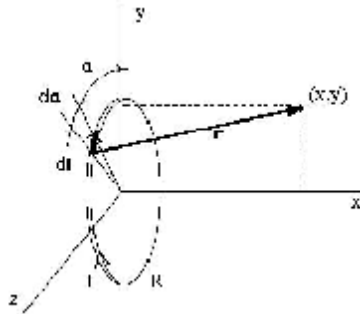


Рис. 1. Виток с током

Для рассмотрения были взяты наиболее распространенные геометрии соленоидов (короткий, $L < R$ и длинный, $L > R$) с размерами (рис. 2): $\alpha = a_2/a_1 = 1.8$ и $\beta = 2b/2a_1 = 0.5$ и 5.0 , где $2a_1 = 100$ мм, $2a_2 = 180$ мм, $2b = 50$ мм и 500 мм, соответственно.

Результаты расчетов продольной и радиальной компонент магнитного поля для короткого и длинного соленоидов представлены на рис. 3-8. На рис.

6-8 представлены компоненты магнитного поля длинного соленоида в зонах 1-3, соответственно.

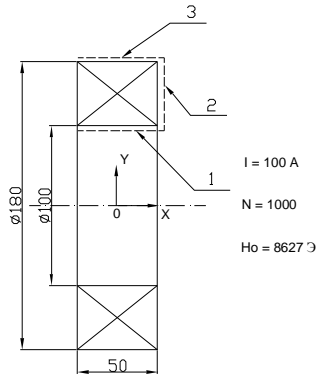


Рис. 2. Соленоид и области измерения магнитного поля

На рис. 2 области 1, 2, 3 выбраны вдоль линии обмотки на расстоянии (удалениях) Δx и $\Delta y = 1 \text{ мм}$ от обмотки, т.е. на расстоянии, примерно равном диаметру СП-кабеля и, соответственно, толщине каркаса и изоляции.

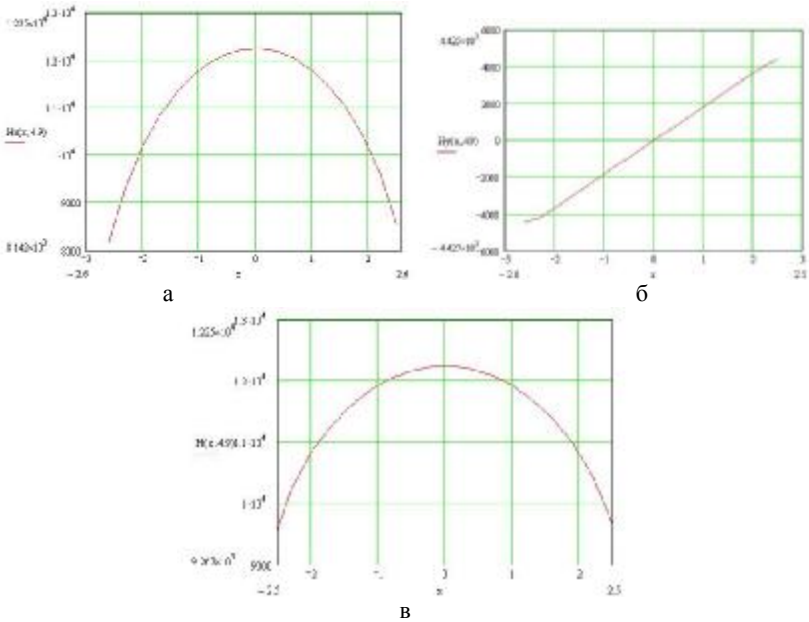


Рис. 3. Компоненты магнитного поля короткого соленоида в области 1: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле

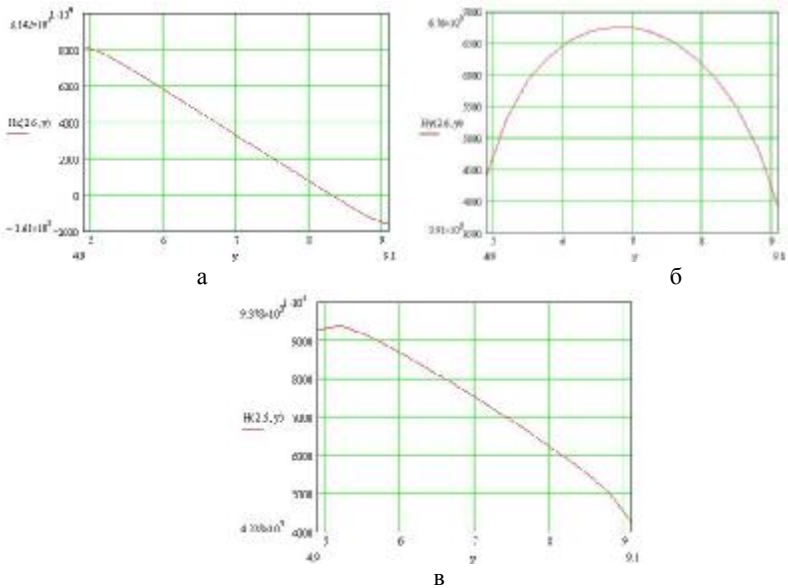


Рис. 4. Компоненты магнитного поля короткого соленоида в области 2: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле

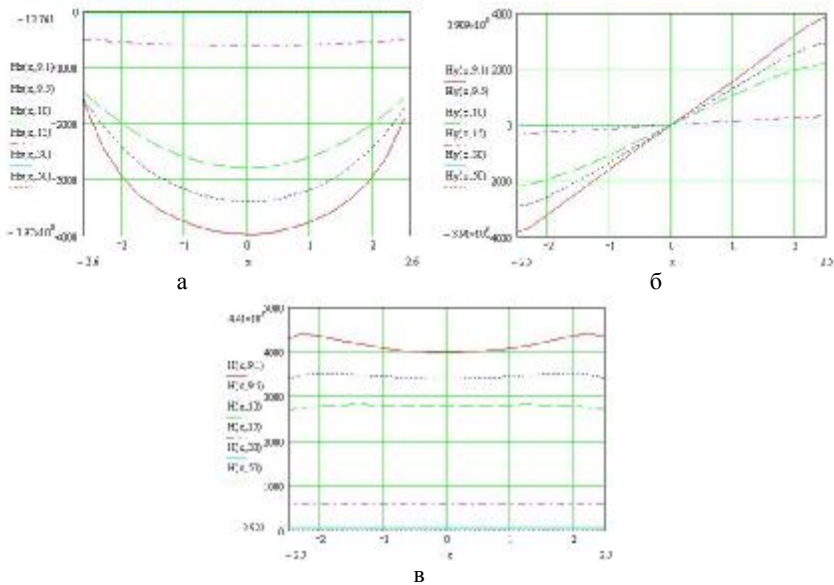
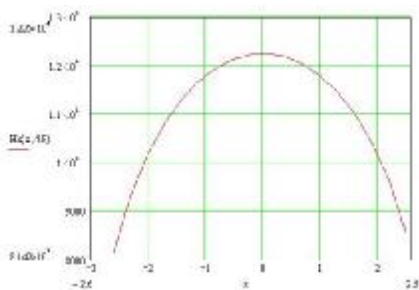
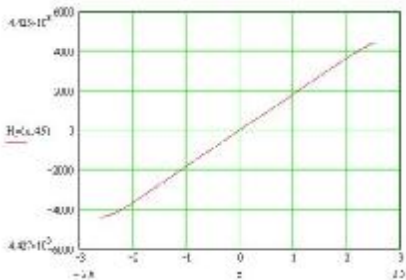


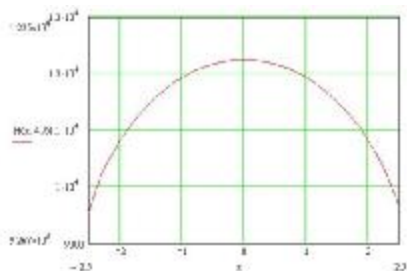
Рис. 5. Компоненты магнитного поля короткого соленоида в области 3: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле



а

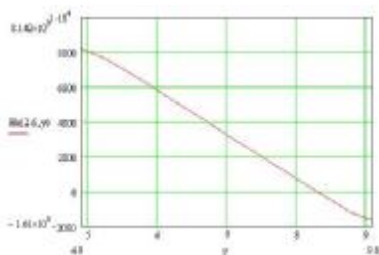


б

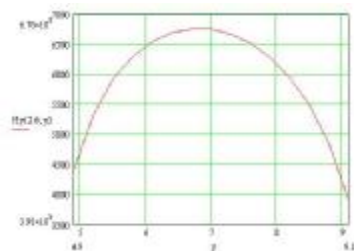


в

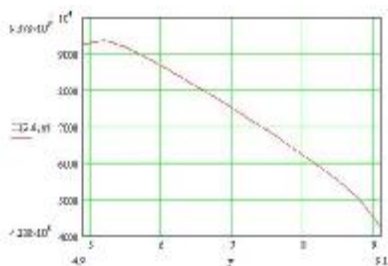
Рис. 6. Компоненты магнитного поля длинного соленоида в области 1: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле



а



б



в

Рис. 7. Компоненты магнитного поля длинного соленоида в области 2: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле

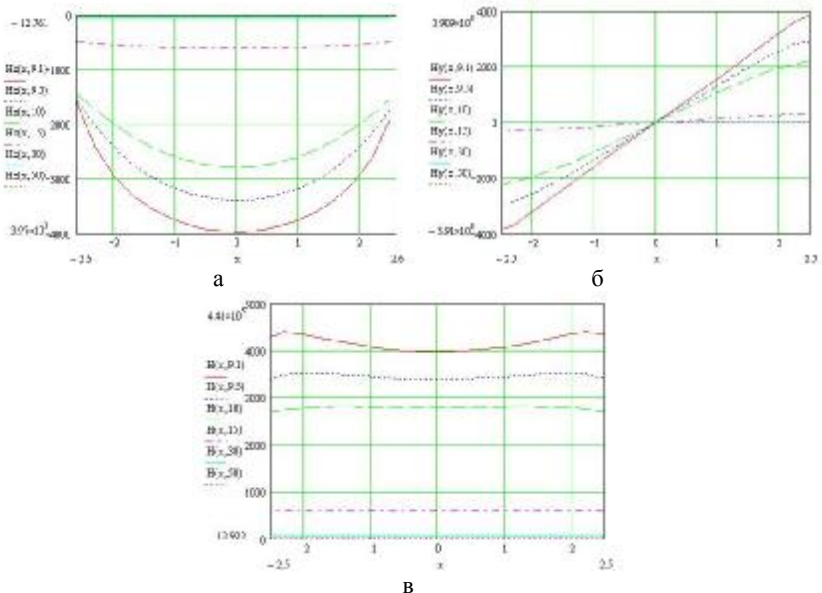


Рис. 8. Компоненты магнитного поля длинного соленоида в области 3: а – продольная компонента; б – поперечная компонента; в – общее поле

Как видно из рисунков, на которых представлены величины магнитного поля, связанные с геометрией соленоидов, целесообразно размещать указанных выше узлы (СП-ключи и СП-токовводы) в области 3 внешнего поля соленоидов, и расстояние от внешних частей обмотки лежит на уровне внутреннего радиуса обмотки соленоида. При этом величина рассеянного магнитного поля находится на уровне процента и менее величины максимального поля соленоида, т.е. вблизи 0 ± 0.01 .

Список литературы: 1. В.Б. Юферов, О.С. Друй, В.О Ильичева, и др. Резонансный плазменный сепаратор для разделения изотопов. Выбор параметров // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника. № 35. 2004. С. 169-179. 2. А.Н. Довбня, О.С. Друй и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов, с колебаниями на циклотронных частотах ВАИТ, Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения № 4. 2004 г. С. 51-57. 3. V.O. Ilichova, S. Druj, V.B. Yufarov, S.V. Sharyj. Development Of The Superconducting Magnetic System Of Plasma Mass-Separator. PAST (VAИT) Series: Nuclear Physics Investigation 2006, № 2 (46), p. 110-113. 4. В.Б. Юферов, О.С. Друй, Е.И. Скибенко, Ю.В. Холод, О.В. Черный, В.О. Ильичева, Е.В. Муфель, А.Н. Рибалко. Сверхпроводящие магнитные системы сложной формы и высокой плотностью транспортного тока. Электротехника і Електромеханіка, ISBN 966-593-254-3, № 2, 2003 р., С. 81-89

Поступила в редколлегию 09.11.2007