

Расчет рабочих параметров сверхпроводящей магнитной системы сферического токамака

Д.А. Александров, И.В. Мартиросян, Е.А. Виноцкий, М.А. Осипов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31;

e-mail: cfjfcfrfdima123@gmail.com

Аннотация

В настоящей работе проведен расчет и построены распределения магнитного поля магнитной системы сферического токамака MEPhIST-1. Определены коэффициенты пропорциональности между максимальной величиной индукции магнитного поля на тороидальной катушке и транспортным током, а также величиной индукции магнитного поля в рабочей точке ($R=0.25$ м) и транспортным током. Построены зависимости критического тока тороидальной катушки от магнитного поля для различных значений температуры. Рассчитаны рабочие параметры настоящей магнитной системы, таких как рабочая температура полоидальных и тороидальной катушек, пропускаемый транспортный ток и число CORC-кабелей в системе тороидального поля токамака. Рабочая температура при рабочей индукции магнитного поля 1 Тл для сборки из 6 CORC-кабелей составила 33.6 К, для рабочего поля 1.5 Тл - 16.6 К.

Ключевые слова: CORC-кабель, токамак, ВТСП, система тороидального магнитного поля.

Введение

Установки типа токамак являются одними из наиболее развитых и перспективных концепций управляемого термоядерного синтеза. Основной принцип его работы заключается в удержании и нагреве плазмы до температур порядка десятков миллионов градусов при помощи мощных магнитных полей. Термоядерный синтез может стать основой

энергетической системы будущего благодаря практической неисчерпаемости этого источника энергии и отсутствию вредных выбросов [1].

Магнитная система токамака включает несколько типов катушек, каждая из которых выполняет специфическую функцию. Тороидальные катушки создают основное удерживающее поле, полоидальные катушки управляют положением и формой плазменного шнура, а центральный соленоид индуцирует ток в плазме и вносит вклад в её нагрев. Основная сложность в проектировании таких систем заключается в необходимости сочетания высокого магнитного поля (большее магнитное поле способствует лучшему удержанию плазмы, увеличивает термоядерную мощность [2] и обеспечивает лучшую устойчивость к возмущения плазмы [3]), механической прочности и долговременной стабильности при минимальных энергетических потерях.

Традиционно магнитная система токамаков основана на медных катушках, однако из-за высоких тепловых потерь и сравнительно низкого рабочего магнитного поля их применение в контексте термоядерного синтеза затруднительно. Поэтому в последнее время были затрачены значительные усилия для разработки сверхпроводящих токамаков на низкотемпературных сверхпроводниках (НТСП), таких как EAST [4], KSTAR [5] и ITER [6]. Особое внимание, в том числе в контексте маломасштабных токамаков, уделено концептам таких систем на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), например SPARC [7].

Целью настоящей работы является определение рабочих параметров магнитной системы сверхпроводящего токамака MEPhIST-1, необходимых для достижения заданной величины индукции магнитного поля в рабочей зоне, а именно рабочая температура, число CORC-кабелей в системе тороидального магнитного поля, величина транспортного тока.

Описание расчетной методики

Расчет магнитной системы токамака выполнен, используя метод конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. При расчете была использована Н-формулировка нестационарных уравнений Максвелла. Разработанная модель ранее применялась для численного анализа индуктивного накопителя энергии основе ВТСП лент, подробное описание численной модели приведено в работе [8].

Схема системы магнитного поля тороидального токамака представлена на рисунке 1 (в полоидальном сечении). Здесь PF соответствует катушкам полоидального магнитного поля токамака, TF – катушке тороидального магнитного поля токамака, которая представляет

собой сборку из нескольких CORC-кабелей, CS – индуктору. Подробно геометрия тороидальной катушки описана в работе [8]. Геометрические размеры полоидальных соленоидов и индуктора также представлены на рисунке 1 (слева). Обозначения R и Z отвечают расстоянию от центра катушек до начала координат по радиальной и вертикальной оси соответственно. Обозначения dR и dZ отвечают размерам катушек по радиальной и вертикальной оси соответственно. Для тороидального соленоида приведены внешний ($R1$) и внутренний ($R2$) радиусы. Суммарный ток через катушки PF1/2 равен 58.8 кА, через PF3/4 – 43.2 кА, через PF5/6 – 34.5 кА, через индуктор – 50 кА, через тороидальную катушку – 50 кА. Цветом на рисунке обозначено направление тока (синим в плоскость рисунка, красным из плоскости). При расчетах использовались данные по критическим характеристикам ВТСП-ленты производства компании С-Инновации [9].

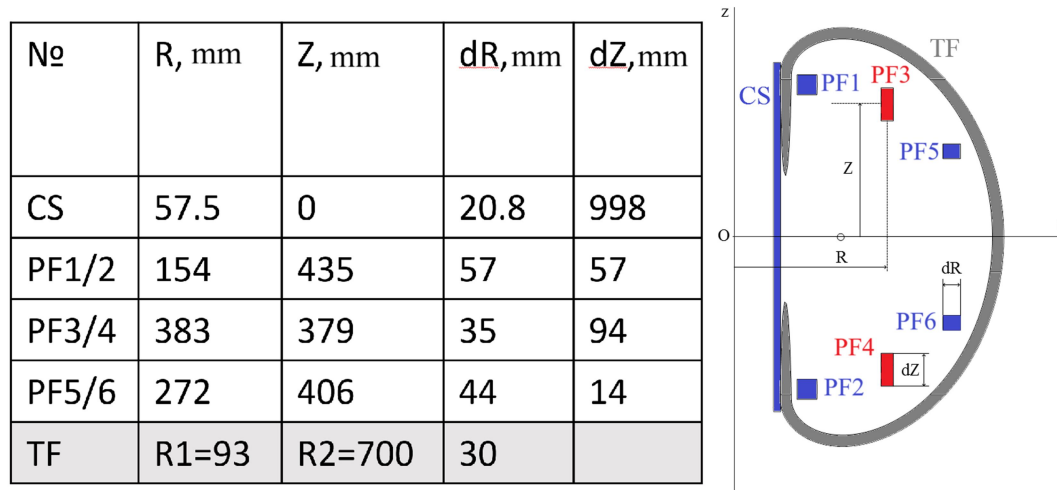


Рис. 1. Слева – геометрические размеры токамака. Справа – схема системы магнитного поля токамака.

Результаты и обсуждение

Чтобы определить рабочие параметры токамака, был произведен расчет распределений магнитного поля системы. Аналогичные вычисления были сделаны для магнитной системы токамака в присутствии плазмы. Плазма для целей настоящей работы была смоделирована в виде тора с поперечным сечением радиусом 10 мм (центр поперечного сечения находится в координате [250 мм, 0 мм], через который пропускается ток величиной 50 кА. На рисунках 2 и 3 представлены распределения индукции магнитного поля в полоидальном сечении в присутствии и в отсутствии плазмы соответственно. Как видно из распределений, максимальная величина индукции магнитного поля на тороидальной катушке в обоих случаях идентична. Исходя из полученных распределений были рассчитаны коэффициенты пропорциональности между пропускаемым через TF током и величиной

индукции магнитного поля в рабочей точке $R=0.25$ м ($k_{\min} = 0.0096$ Тл/кА) и между пропускаемым через TF током и максимальной величиной индукции магнитного поля на тороидальной катушке ($k_{\max} = 0.0264$ Тл/кА). Ранее аналогичные расчеты были проведены только для тороидальной магнитной системы [10].

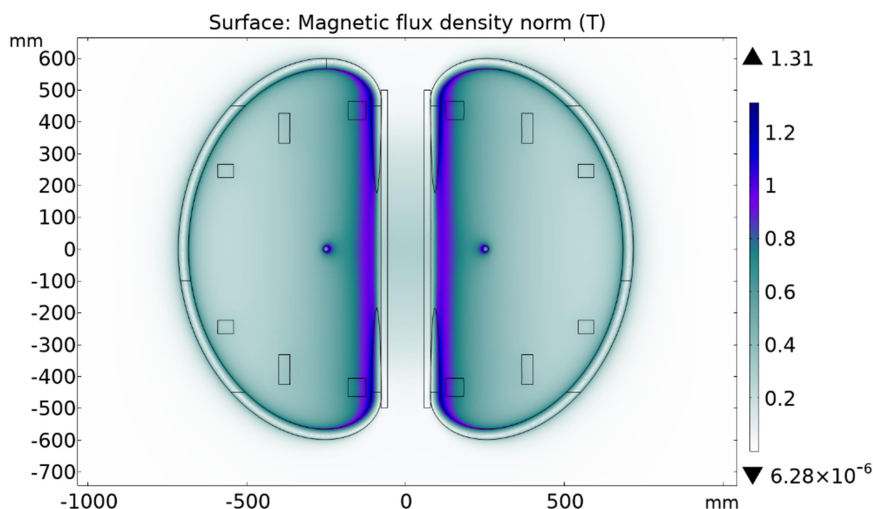


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля в полоидальном сечении в присутствии плазмы.

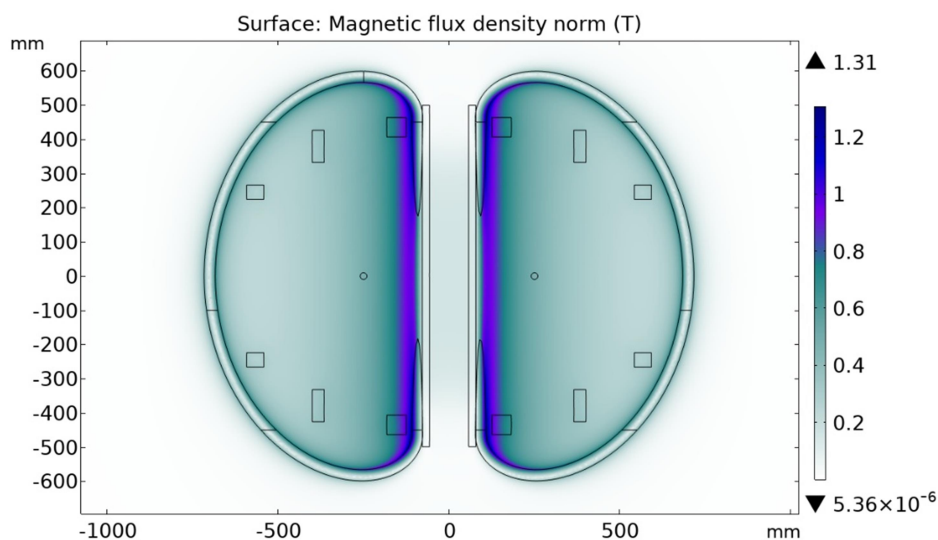


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля в полоидальном сечении в отсутствии плазмы.

По полученным данным была построена нагрузочная кривая тороидальной магнитной системы (рисунок 4):

$$B_{\max} = I \cdot k_{\max}. \quad (1)$$

На том же графике для 6 CORC-кабелей в катушке были построены зависимости максимально возможного транспортного тока, пропускаемого через тороидальную

магнитную систему от величины индукции магнитного поля для различных температур (выражение (2)).

$$I_c(B, T) = L_q(B, T) \cdot N \cdot N_2 \cdot I_{0c}, \quad (2)$$

где $L_q(B, T)$ – лифт-фактор, N – число CORC-кабелей, N_2 – число лент в одном кабеле (50 лент), I_{0c} – критический ток 4 мм ленты в азоте в собственном поле. I_{0c} полагался равным 160 А, что составляет 80 процентов от максимально возможного.

Пересечение этих зависимостей позволило оценить величину рабочего значения тока $I_{раб}(T, N)$ через катушку для заданного значения температуры T и числа CORC-кабелей N . Из рабочего значения тока можно найти рабочее поле согласно выражению (3).

$$B_{раб}(T, N) = I_{раб}(T, N) \cdot k_{min}. \quad (3)$$

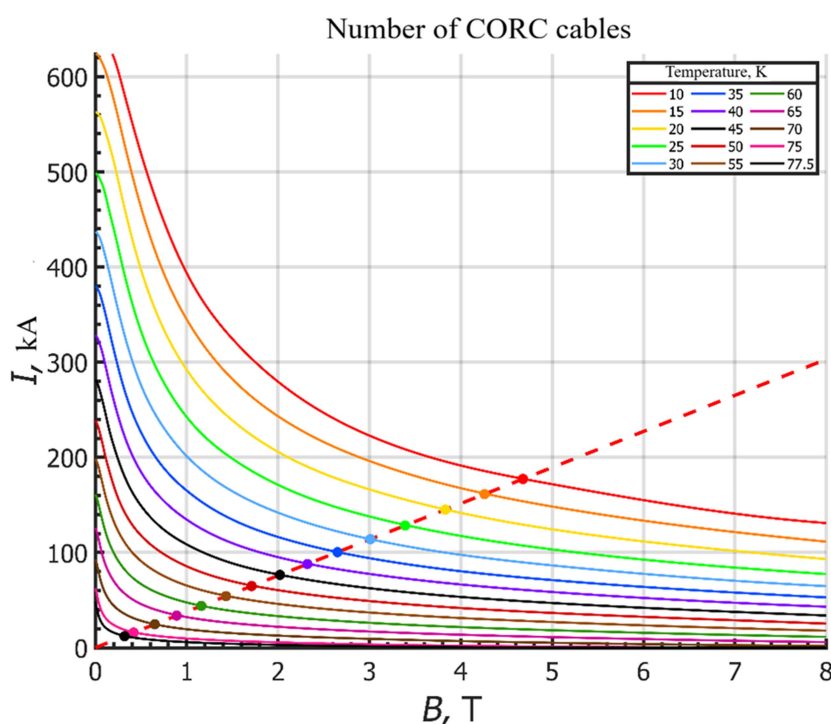


Рис. 4. Зависимости критического тока сборок CORC-кабелей от внешнего магнитного поля при различных температурах (сплошные линии); нагрузочная кривая тороидальной магнитной системы (пунктирная линия).

Исходя из полученных данных, были оценены рабочие температуры для сборок тороидальной магнитной системы из различного числа CORC-кабелей (рисунок 5). Как видно из зависимостей рабочее магнитное поле в 1 Тл на 6 CORC-кабелях может быть достигнуто при температуре 33.6 К. Также возможно достижение рабочего поля в 1.5 Тл при температуре 16.6 К, что на 0.1 К меньше чем в случае только тороидальной системы магнитного поля [10].

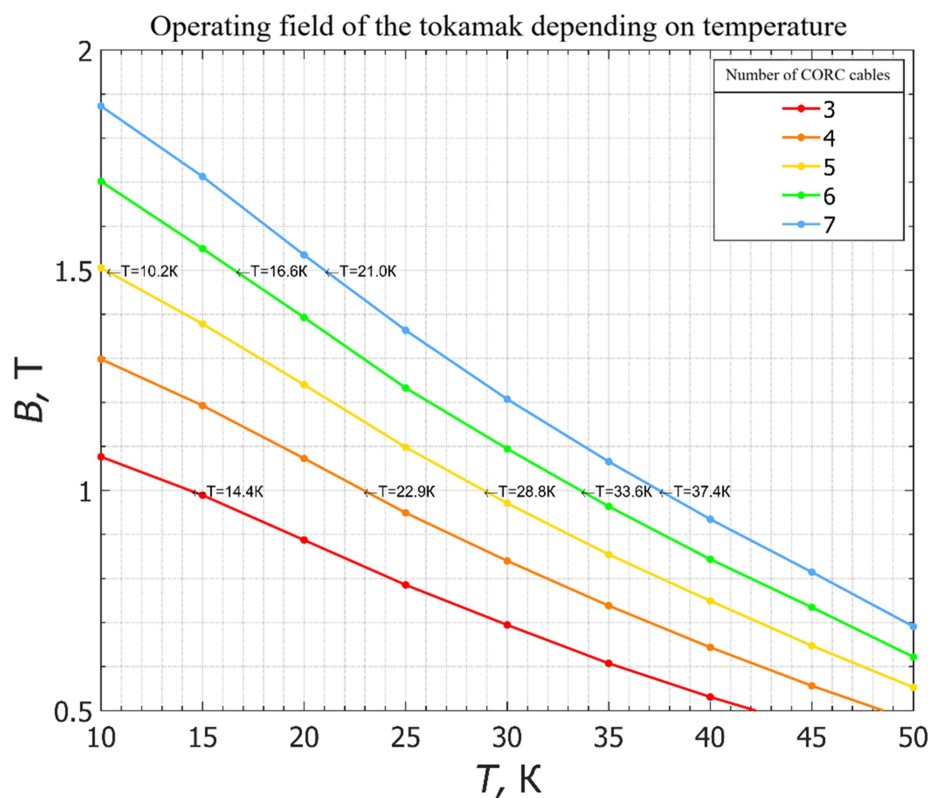


Рис. 5. Зависимость рабочего поля токамака от температуры для различного количества CORC-кабелей в тороидальной катушке.

Также проведена оценка рабочей температуры для полоидальных катушек. Для этого для каждой из катушек был рассчитан лифт-фактор согласно выражению 2. $L_q(B, T)$ равен 0.15, 0.1125 и 0.14375 для PF1/2, PF3/4 и PF5/6 соответственно. Для величины рабочего магнитного поля 0.48 Тл, максимальная величина индукции магнитного поля равна 1 Тл, 0.388 Тл, 0.355 Тл для PF1/2, PF3/4 и PF5/6 соответственно. Исходя из полученных данных, рабочая температура даже в худшем случае для магнитного поля 1 Тл больше 77 К, что позволяет использовать охлаждение жидким азотом (средний лифт-фактор в магнитном поле 1 Тл при 77 К равен 0.16, в магнитном поле 0.48 Тл – 0.28 [9]). Для величины рабочего магнитного поля 1 Тл, максимальная величина индукции магнитного поля равна 2.08 Тл, 0.73 Тл, 0.696 Тл для PF1/2, PF3/4 и PF5/6 соответственно. В этом случае рабочая температура для PF1/2 больше 65 К, а для PF3/4 и PF5/6 больше 77 К.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования магнитной системы сверхпроводящего токамака MEPhIST-1, включающую в себя систему тороидального поля, индуктор и полоидальные катушки. На основе рассчитанных распределений магнитного поля определены коэффициенты пропорциональности, связывающие максимальную величину индукции магнитного поля на катушке с

транспортным током, а также величину индукции магнитного поля в рабочей точке $R=0.25$ м с транспортным током. Полученные коэффициенты пропорциональности составили: для максимального поля на катушке – $k_{\max} = 0.0264$ Тл/кА, для рабочего поля – $k_{\min} = 0.0096$ Тл/кА. Проведены расчёты зависимости критического тока сборки, состоящей из различного числа CORC-кабелей, от внешнего магнитного поля при различных температурах, а также зависимости рабочего поля токамака от температуры для нескольких вариантов числа кабелей. Определены основные рабочие параметры системы тороидального магнитного поля: рабочая температура, величина транспортного тока и необходимое количество CORC-кабелей для обеспечения заданного магнитного поля при различных температурных режимах. Для сборки из 6 кабелей рабочее поле в 1 Тл может быть достигнуто при температуре 33.6 К, а в 1.5 Тл при температуре 16.6 К. Учет катушек полоидального поля и индуктора привел к понижению рабочей температуры на 0.1 К. Также оценена рабочая температура для полоидальных катушек для рабочего поля в 1 Тл: для PF1/2 больше 65 К, а для PF3/4 и PF5/6 больше 77 К.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00749, <https://rscf.ru/project/24-29-00749/>.

Список литературы

1. P. Muehlich, T. Hamacher. Global transportation scenarios in the multi-regional EFDA-TIMES energy model. *Fusion Eng. Des.* Vol. 84, No. 7, pp. 1361-6 (2009). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.016
2. G. Federici, M. Siccinio, C. Bachmann, L. Giannini, C. Luongo, M. Lungaroni. Relationship between magnetic field and tokamak size—a system engineering perspective and implications to fusion development. *Nucl. Fusion.* Vol. 64, No. 3, p. 036025 (2024). DOI: 10.1088/1741-4326/ad2425
3. H. Zohm. On the Use of High Magnetic Field in Reactor Grade Tokamaks. *J. Fusion Energy.* Vol. 38, No. 1, pp. 3-10 (2019). DOI: 10.1007/s10894-018-0177-y
4. X. Gao, T. Zhang, M. Wu, G. Li, L. Zeng, E.T. the. Recent results of fusion triple product on EAST tokamak. *Plasma Sci. Technol.* Vol. 23, No. 9, p. 092001 (2021). DOI: 10.1088/2058-6272/ac1165
5. H.-S. Kim, Y. Jeon, H. Han, K. Kim, K. Kim, H. Kim, T. Rhee, J. Kim, J. Kim, D. Seo, E. Bang, H.-J. Ahn, H.-S. Ahn, J. Hong, J. Jeong, J. Kong, J.-G. Kwak, J. Jin, J. Bak, K. Park, K.-D. Lee, M. Joung, S.W. Kwag, S.-H. Hahn, S. Kim, S.-W. Yoon, S. Wang, W.C. Kim, Y.-O. Kim, K.

- Teams. Development of high-performance long-pulse discharge in KSTAR. Nucl. Fusion. Vol. 64, No. 1, p. 016033 (2024). DOI: 10.1088/1741-4326/ad0fbd
6. N. Holtkamp. An overview of the ITER project. Fusion Eng. Des. Vol. 82, No. 5, pp. 427-34 (2007). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2007.03.029
7. A.J. Creely, M.J. Greenwald, S.B. Ballinger, D. Brunner, J. Canik, J. Doody, T. Fülöp, D.T. Garnier, R. Granetz, T.K. Gray, C. Holland, N.T. Howard, J.W. Hughes, J.H. Irby, V.A. Izzo, G.J. Kramer, A.Q. Kuang, B. LaBombard, Y. Lin, B. Lipschultz, N.C. Logan, J.D. Lore, E.S. Marmar, K. Montes, R.T. Mumgaard, C. Paz-Soldan, C. Rea, M.L. Reinke, P. Rodriguez-Fernandez, K. Särkimäki, F. Sciortino, S.D. Scott, A. Snicker, P.B. Snyder, B.N. Sorbom, R. Sweeney, R.A. Tinguely, E.A. Tolman, M. Umansky, O. Vallhagen, J. Varje, D.G. Whyte, J.C. Wright, S.J. Wukitch, J. Zhu. Overview of the SPARC tokamak. J. Plasma Phys. Vol. 86, No. 5, p. 865860502 (2020). DOI: 10.1017/S0022377820001257
8. D.A. Alexandrov, I.V. Martirosian, S.V. Pokrovskii, V.V. Zaletkina, I.A. Rudnev. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes. Modern Transportation Systems and Technologies. Vol. 10, No. 2, pp. 215-30 (2024). DOI: 10.17816/transsyst632274
9. A. Molodyk, S. Samoilenov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A.E. Pantoja, S.C. Wimbush, N.M. Strickland, A. Vasiliev. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion. Sci. Rep. Vol. 11, No. 1, p. 2084 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z
10. D.A. Aleksandrov, I.V. Martirosian, E.A. Vinitskiy, M.A. Osipov, S.V. Pokrovskii. Determination of operating parameters of toroidal field coils of a tokamak based on a high-temperature superconductor. Modern Transportation Systems and Technologies. Vol. 11, No. 3, pp. 409-21 (2025). DOI: 10.17816/transsyst687274

Поступила в редакцию 17 октября 2025 г.

После доработки 10 декабря 2025 г.

Принята к публикации 10 декабря 2025 г.