удк 621.039 СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РОССИЙСКОГО ТОКАМАКА — ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЕМО-ТИН

Д.П. Иванов, И.О. Анашкин, Б.Н. Колбасов

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Приводится описание сверхпроводниковой магнитной системы для проектируемого в России термоядерного источника нейтронов — токамака с классическим аспектовым отношением около 3, большим радиусом R = 2,75 м, малым радиусом a = 0,9 м, током плазмы I = 5 MA, магнитным полем на оси $B_0 = 5$ Tл и $B_{max} = 12$ Tл. Магнит имеет 18 катушек размером 5×9 м, ток в каждой из них 3,8 MA, площадь сечения всего 0,2 м². Такая малая площадь катушки связана с необходимостью размещения между плазмой и катушками защиты от радиации толщиной не менее 0,5 м. Очень высокая конструктивная плотность тока $j_{pa6} = 18$ MA/m² вдвое выше достигнутой в существующих и строящихся больших магнитах, и высокие механические нагрузки при ограниченной площади для размещения структуры магнита требуют новых технических подходов. На основании проведённых оценок предлагаются следующие решения: поскольку корпус слишком тонок для восприятия действующих сил, ему необходима поддержка жёсткой обмотки из токонесущих элементов с толстым кожухом, изоляция должна быть только внутри, кабель внутри из плотной плоской скрутки (резерфордовского типа) из 7-жильных субкабелей, плотно скрученных из проводов на основе ниобий—олова, таких же, как в центральном соленоиде ИТЭР. Предлагаются прокачное охлаждение магнита поперечным потоком гелия низкого давления для эффективного отвода тепла радиационного нагрева, использование корпуса для снижения напряжения защитного вывода энергии и др. технические решения. Приведены обоснование необходимости и оценки эффективности этих предложений.

Ключевые слова: сверхпроводниковый магнит, токамак, источник нейтронов.

SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR RUSSIAN TOKAMAK — FUSION NEUTRON SOURCE DEMO-FNS

D.P. Ivanov, I.O. Anashkin, B.N. Kolbasov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper describes the superconducting magnet system for fusion neutron source based on tokamak with the classic aspect ratio about 3, which is under designing at present in Russia. Plasma major radius plans to be R = 2.75 m, minor one a = 0.9 m, plasma current I = 5 MA, magnetic field on the plasma axis $B_0 = 5$ T and $B_{max} = 12$ T. The magnet has 18 coils with dimensions of 5 m × 9 m and the current 3,8 MA in each one, while its cross section area is only 0.2 m² due to the needs for coils protection from irradiation with the shield thickness not less than 0.5 m. Therefore the constructive current density j = 18 MA/m², which is twice more than in all existed big magnets Very strong forces acting on the coils and very restricted space for magnet structure request new design approaches. The preliminary estimations shows that the case alone is not able to keep the forces acting on it and needs the support of very rigid winding, which should consist from the current carrying elements with thick steel case that has the insulation inside it only; the cable inside it should be flat (Rutherford type), each one from 7 NB₃Sn wires, like in ITER central solenoid; the cooling by low pressure transverse He flow for effective removal of irradiation heat; the coil case use for dumping voltage reduction etc. Substantiation of these suggestions and the estimations of their efficiency are given.

Key words: tokamak, superconducting magnet, neutron source.

введение

Магнитная система для термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН, проектируемого в России, на основе токамака с классическим аспектовым отношением плазменного шнура (ПШ), равным ~3, состоит из сверхпроводниковых (СП) магнитов тороидального и полоидального полей и индуктора. Наиболее сложный тороидальный магнит должен создавать поле $B_0 = 5$ Тл на оси ПШ радиусом R = 2,75 м (малый радиус ПШ 0,9 м, ток плазмы 5 МА). Суммарный ток 18 тороидальных катушек должен быть $5B_0R \sim 69$ МА при общем запасе энергии в магните около W = 6 ГДж. Режим работы стационарный. Обычный водоохлаждаемый магнит с такими параметрами потребовал бы мощности питания порядка 1 ГВт. Так что использование СП-обмотки достаточно обосновано.

Для снижения потоков нейтронов и гамма-излучения на СП-обмотки вокруг плазменного шнура необходимо разместить радиационную защиту толщиной $\geq 0,5$ м. Поэтому наружный радиус центральной колонны тороидальных обмоток, где магнитное поле максимально (12 Тл), не превышает 1,2 м. При этом её внутренний радиус должен быть не менее 0,5 м для размещения хотя бы минимального индуктора. Таким образом площадь сечения одной тороидальной катушки в центральной зоне всего 3,7 м²/18 = 0,2 м². Сечение катушки трапециидальное с радиальной толщиной 0,65, шириной по наружному обводу 0,4 м и всего 0,176 м по внутреннему обводу. Поэтому конструкция очень напряжён-

ная как по механической прочности, так и по конструктивной плотности тока, достигающей 18 MA/м², что почти в два раза превышает соответствующие значения в существующих магнитах.

В мировой практике СП-магниты такого размера со столь сильными полями, большой конструктивной плотностью тока и сложной формой очень крутого тора пока не существуют. Однако опыт сооружения токамаков Т-7 [1, 2], T-15 [3], EAST [4], KSTAR [5], SST-1 [6] и ИТЭР показывает возможность проектирования и сооружения магнита с указанными параметрами, хотя из-за предельно жёстких требований и параметров на грани возможностей требуются разработки и применение некоторых новых конструктивных решений, ещё не проверенных практикой использования. В данной работе рассмотрены проблемы, возникающие при создании такого магнита, приведены описания возможных решений этих проблем и их мотивировка.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КАТУШКИ

Наиболее сложной частью магнитной системы является тороидальный магнит, имеющий форму очень крутого тора. На внутренних «ногах» (вертикальных частях) его катушек величина магнитного поля достигает 12 Тл, и на них действуют огромные силы, стягивающие их внутрь к оси тора. Они распределены практически равномерно по окружности и создают радиальное давление магнитного поля на поверхности катушки до 60 МПа и радиальную силу 24 МН/м высоты (220 МН на каждую катушку). Эти силы воспринимаются только арочным распором внутренних «ног» тороидальных катушек и лишь на концах частично ослаблены оттягивающим воздействием магнитного поля на внешние части катушек. Вблизи экватора этим оттягиванием наружу можно пренебречь, так как длина прямолинейных участков катушки около 7 м, т.е. достаточно велика, и они прогнутся внутрь настолько, насколько позволит арочный распор. Так что в средней части магнита удерживать давление поля будет только он один.

При угле клина с каждой стороны 10° (0,15 рад) силы, сдавливающие катушку с обеих сторон, будут примерно в три раза больше радиальной силы — по 660 МН с каждой стороны. При этом боковое давление (в тороидальном направлении) при высоте 7 м и ширине 0,65 м будет в среднем 150 МПа. Однако если катушка будет состоять из относительно мягкой обмотки, состоящей из кабелей, покрытых изоляцией, стеклотекстолитовых клиньев и корпуса с тонкими боковыми стенками, то основная часть сжимающего усилия будет сосредоточена на относительно небольшом жёстком клиновом «носу» катушки. Если даже он будет занимать треть ширины катушки, то локальные напряжения сжатия над ним будут достигать 450 МПа.

Кроме бокового сжатия, на катушку действуют очень большие силы вертикального растяжения, составляющие до 56 МН на катушку. Поскольку радиальная ширина корпуса соизмерима с минимальным радиусом её изгиба, катушка не является безмоментной и растягивающая сила, действующая на внутреннюю ногу, значительно больше, чем на внешнюю ногу, — до 36 МН. Если обмотка мягкая и корпус в целом будет занимать половину сечения катушки, т.е. 0,1 м², то напряжение растяжения в нём может достигать 360 МПа.

Напряжение растяжения и поперечного сжатия имеет разные знаки. Поэтому оценка среднего эффективного напряжения в корпусе внутренней «ноги» по формуле Треска даёт величину около 600 МПа, т.е. превышающую предельно допустимое напряжение для нержавеющей стали типа 316 LN при температуре 4 К. Это среднее напряжение при самом грубом учёте неоднородностей нагрузок и в предположении, что обмотка занимает 2/3 сечения по толщине и 2/3 по ширине, т.е. меньше половины сечения катушки. Необходимость увеличения доли обмотки в сечении и учёт неизбежных локальных перенапряжений увеличат механическое напряжение, которое может превысить допустимые пределы.

Поэтому представляются очевидными неприемлемость обычной мягкой обмотки и необходимость заставить её воспринимать часть нагрузок вертикального растяжения, а главное — обеспечить передачу бокового сжатия с одной стенки корпуса катушки на другую, чтобы катушка в целом была клином, а не только сплошной «нос» обеспечивал бы ей клиновый распор. Это можно сделать, если витки обмотки будут иметь толстые корпуса из нержавеющей стали с небольшими, около половины сечения или даже меньше, овальными каналами внутри для расположения в них кабеля и каналов охлаждения. Изоляцию витков также целесообразно разместить внутри корпусов, чтобы она не подвергалась большим механи-

ческим усилиям, а передавала на свой корпус лишь усилие одного витка, далее жёсткая структура опирающихся непосредственно друг на друга корпусов собирала бы нагрузки витков и передавала их на корпуса катушек во всех трёх направлениях, т.е. работала так же, как радиальные панели в катушках тороидального поля ИТЭР [7]. Для передачи радиального сжатия достаточно 20—25% заполнения сечения структуры катушки сталью, для обеспечения жесткости, необходимой для передачи бокового сжатия (150 МПа в среднем) с клиновой части стенки через обмотку на клиновую часть противоположной стенки этой же катушки, надо 40—50% заполнения сталью.

Таким образом, обеспечение необходимой жёсткости обмотки требует заполнения сталью около половины её сечения и при заполнении обмоткой 70% общего сечения катушки она сможет взять на себя примерно половину продольного растяжения и бокового сжатия, снизив создаваемые ими напряжения до 180 и 230 МПа соответственно. Суммарное напряжение при этом будет около 380 МПа, что обеспечивает приемлемый запас прочности для стали типа 316 LN при температуре 4 К.

Эти грубые оценки показывают, что сечение стали корпуса и бандажей или кожухов кабеля вдоль катушки должно занимать около 60—70% её общего сечения. Таким образом, при обеспечении необходимой жёсткости катушки в поперечном и продольном направлении на собственно токонесущий кабель, стабилизацию и охлаждающие каналы обмотки остаётся не более 30—40% сечения катушки.

ВЫБОР РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБМОТКИ, ВЕЛИЧИНЫ ТОКА И РАЗМЕРОВ СЕЧЕНИЯ КАЖДОГО ВИТКА МАГНИТА

Для возможно более полного заполнения трапециидального сечения (одинакового вокруг всей катушки) размеры каждого витка — токонесущего элемента (ТНЭ) — должны быть возможно меньше. Но для снижения напряжения защитного вывода энергии из магнита при переходе в нормальное состояние ток

единичного ТНЭ должен быть возможно больше. Учитывая это противоречие, оптимальным представляется размер ТНЭ шириной 25 и толщиной 22—25 мм, намотанный в виде двух двойных галет по 44 витка, двух по 36 витков и двух крайних двойных галет по 18 витков с передачей радиального усилия на боковые клинья в трёх местах для снижения локальных перегрузок в стенке корпуса, возникающих при передаче на корпус радиальных усилий на витки катушки. Сечение всего магнита и отдельной катушки показано на рис. 1.

Галеты обмотки окружены корпусом с тонкой внутренней стенкой, боковыми клиновыми стенками переменной (3-ступеньчатой) толщины и толстым внутренним клиновым «носом». Корпус состоит из двух половин, каждая из которых состоит из семи кованых сегментов, сваренных встык, как это делается в ИТЭР. При таком раскладе всё-таки только 70% сечения катушки используется для обмотки. Переход к вдвое меньшей ширине ТНЭ с 4—5 ступенями по ширине приводит к уменьшению потери сечения из-за трапециидальности его формы на 7%, но к 4-кратному увеличению напряжения при выводе тока, что нецелесообразно.

При таких размерах ТНЭ в катушке помещаются 174—186 витков. Для получения общего тока 69 МА надо иметь в каждой из 18 катушек по 3,8 МА, т.е. по 20—22 кА в каждом витке.



a R = 2750 R = 1200 R = 500 25 2525

Рис. 1. Сечение магнита тороидального поля по экватору: 18 катушек, $B_0 = 5$ Тл, $I_{oбщ} = 69$ МА, $I_{катуш} = 3,8$ МА (*a*); сечение одиночной катушки 0,2 м², 174 витка, 22 кА/виток (δ)

= 700 А/мм² или 180 А в проводе диаметром 0,82 мм и площадью сечения 0,52 мм², половина которого занята стабилизирующей медью. Реально такой провод, выпускаемый Чепецким механическим заводом (ЧМЗ), имеет в поле 12 Тл, критический ток 210—220 А. Для обеспечения 22 кА и хотя бы 50% запаса по токонесущей способности (превышение критического тока по сравнению с рабочим током *I*_{раб}) в кабеле должно быть 150 проводов, а для надёжной работы магнита желательно иметь не менее 200 проводов.

КОНСТРУКЦИЯ ТОКОНЕСУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА



Рис. 2. Варианты конструкции ТНЭ с принудительным охлаждением: *a* — 22 кА; *б* — 17 кА

Один из рассмотренных вариантов возможной конструкции поперечного сечения катушки показан на рис. 1, сечение различных вариантов ТНЭ — на рис. 2, *a*, б. Конструкция, показанная на рис. 2, *a*, — это ТНЭ типа «кабель в кондуите» размером 25×25 мм, т.е. точно такой же, как использованный в КСТАР и аналогичный по конструкции применённому на большинстве современных установок и в ИТЭР. В КСТАР он несёт 35 кА в поле 7 Тл, а в ДЕМО-ТИН должен нести 22 кА в поле 12 Тл, т.е. он как раз удовлетворяет требованиям по токонесущей способности с достаточно хорошим запасом (I_{раб} ~ 70% I_{кр}). Технология его изготовления хорошо отработана (правда, не в России, а в США, Корее, Китае и Японии) и не требует специальных НИОКР. Однако его кожух (кондуит) слишком тонок и не обеспечивает требуемой жёсткости обмотки. Хотя, конечно, можно сделать кондуит с увеличенной толщиной стенок кожуха, но при этом придётся пойти на уменьшение свободного пространства для прохода гелия внутри кабеля и его гидравлическое сопротивление может стать слишком большим. На JT 60-AS такой толстостенный кондуит сделан, но из стали 316, которая с Nb₃Sn не совместима, а применение технологии «обжатия» толстой полосой инколоя 908 (как на КСТАР) может встретить сложности. Очевидно, лучше сделать квадратный кожух, сваренный из двух половин прямоугольной прокатанной шины, как это сделано в кабеле для ЦС ИТЭР [8].

Вообще применение толстого, рыхло скрученного (для прохода гелия) кабеля даже внутри жёсткого квадратного

кондуита всё-таки представляется неоптимальным вариантом ввиду внутренней противоречивости требований по фиксации жил кабеля и малого гидравлического сопротивления. Испытания образцов кабеля ИТЭР и вставки из кабеля для тороидального поля показали, что смещение, изгиб и пережатие проводов при нагружении такого кабеля током приводят к деградации его токонесущей способности [9, 10]. Для уменьшения этих явлений скрутку кабеля надо делать возможно более плотной.

Жёсткость катушки снижается также, поскольку изоляция витков обычно кладётся поверх кожуха витка. В ЦС ИТЭР внешняя изоляция может выдержать нагрузку от давления поля 14 Тл потому, что основная часть этой нагрузки воспринимается кривизной витков цилиндрического магнита. Но в спрямлённых участках внутренних «ног» тороидальной обмотки магнита ДЕМО-ТИН кривизны нет, и для избежания повреждения изоляции давлением 60 МПа и обеспечения поперечной жёсткости катушки витковую и корпусную изоляцию желательно исключить. В ИТЭР проблема поперечной фиксации витков в спрямлённой части катушки и передачи радиальных и поперечных усилий с них на клиновой корпус решается размещением изолированных витков в каналах радиальных пластин. Однако эта технология сложна и её отработка потребовала больших усилий и затрат [7, 11]. По-видимому, её можно решить проще, если организовать подобие радиальных пластин прямой намоткой бандажей витков друг на друга и рядом друг с другом без изоляции, разместив её между кабелем и бандажом каждого витка в отдельности.

Корпусная изоляция также снижает поперечную прочность катушки и к тому же требует расположения в ней двух клиньев, исключая необходимую для них часть сечения из восприятия вертикального растяжения. Кроме того, большая радиальная толщина кабеля (20 мм) при минимальном радиусе катушек 1700 мм требует сложной технологии «намотки до отжига», чего также желательно избежать [11]. Для этого в магните ДЕМО-ТИН толщина кабеля поперёк изгиба не должна превышать 10—12 мм при ширине 16—18 мм.

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТНЭ С БОЛЕЕ ЖЁСТКОЙ И УПОРЯДОЧЕННОЙ ПЛОСКОЙ СКРУТКОЙ

Предпочтительным представляется вариант ТНЭ с более жёсткой и упорядоченной плоской скруткой, обеспечивающей хорошую фиксацию проводов, хотя и с несколько худшим их охлаждением (см. рис. 2, δ). Такой ТНЭ целесообразно изготовить из СП-провода в виде плоской скрутки типа резерфордовской, используемой для диполей и магнитов ускорителей и освоенной ранее нашей промышленностью (ВНИИ КП) для ускорительно-накопительного комплекса. Но если необходимые нам 150—200 проводов с критическим током 220 А/провод (при 12 Тл) заложить в двухслойную плоскую скрутку, она будет слишком широкой. Поэтому лучше использовать двухступенчатую скрутку: сначала в 48 триплетов (144 провода по 150 А, т.е. около 47% критического тока). Затем из слегка поджатых волочением до диаметра 1,7 мм триплетов (если опыт покажет, что такая деформация не нарушит структуру и токонесущую способность проводов) сделать плоскую двухслойную скрутку шириной 36 мм, согнутую в продольном направлении в четырёхслойную скрутку шириной 18 мм. Такой перегиб существенно уменьшит потери от поперечного переменного поля.

В сечении рассматриваемого варианта можно разместить достаточное количество бандажной стали, непосредственно участвующей в упрочнении обмотки, что устраняет необходимость технологических клиньев для наложения корпусной изоляции, поскольку она отсутствует. Витковая изоляция положена прямо на кабеле внутри бандажей и нагружена только усилием одного витка, суммарное радиальное усилие передаётся прямо с бандажа на соседний бандаж (заменяя радиальные пластины, применённые в ИТЭР) и затем на ступени стенки корпуса.

Но этот вариант имеет ограниченное сечение собственно кабеля и, соответственно, малый запас токонесущей способности — всего 40% (I_{раб} = 60% I_{кр}). Так что, по-видимому, целесообразно увеличить число проводов первой стадии скрутки. Можно значительно увеличить запас по току, если делать двухслойную ленту не из триплетов, а из кабелей, содержащих 4, 5 и даже 7 проводов (6 + 1 медный), уплотнённых протяжкой или подкаткой (допустимой степени) до минимального радиуса. Если окажется, что подкатка неприемлемо нарушает структуру провода, то и без неё толщина кабеля из семи проводов не превышает 2,5 мм и для плоской двухслойной скрутки, согнутой пополам в 4 слоя, составляет приемлемые 10 мм (или 12 мм с внутренней опорной пластиной). Более того, в рассмотренном далее «прокачном» варианте охлаждения магнита эффективность охлаждения неуплотнённой скрутки будет лучше, хотя фиксация проводов практически сохранится. Оптимальное их количество должно быть подобрано, учитывая требования и возможности технологии, а также из требования сохранения ширины сложенной пополам двухслойной скрутки в пределах 18—20 мм, радиальной толщины скрутки кабеля в пределах 10—12 мм для сохранения возможности «намотки после отжига». При этом число скруток может составлять 38-40, СП-проводов в них 230—240. Критический ток такого кабеля будет более 45 кА, т.е. в 2 раза больше рабочего, что позволит обеспечить хороший температурный запас. Однако до сих пор он не применялся и требует НИОКР с изготовлением и испытаниями образцов кабеля и модельных катушек из него.

ОХЛАЖДЕНИЕ ТНЭ

Для охлаждения сложенная пополам и термообработанная плотная плоская скрутка может быть спаяна с 8—10 медными трубками размером $3\times0,5$ мм для прохода хладагента (жидкого He), как это показано на рис. 2, δ . Такой паяный кабель изолируется каптоном или стеклослюдяной лентой и закладывается в прокатанную шину П-образного сечения из нержавеющей стали типа 316 LN с наружным размером $20\times12,5$ мм и прикрывается такой же крышкой, присоединённой продольной сваркой. При этом плоская скрутка проводов располагается на середине или на некотором расстоянии от нейтральной линии THЭ, оптимальном для токонесущей способности (растянута до относительной деформации $\varepsilon = +0,002$). При этом в радиальном направлении сталь занимает 25% сечения бандажа, в поперечном направлении 50%, а не 33% и 66%, как это желательно соответственно предыдущей оценке прочности для 5 Тл. Но так как стальной корпус занимает 30% сечения катушки, а в остальных 70% сечения собственно обмотки катушки стальной бандаж также занимает ещё 50% общего сечения катушки, то в общем сечении сталь занимает 80% и в среднем поперечные напряжений.

Целесообразно также рассмотреть возможность использования более прочных сталей или сплавов и других материалов для изготовления бандажей обмотки и корпуса, чтобы увеличить часть сечения для собственно обмотки магнита.

СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МАГНИТА

Мы рассмотрели лишь принудительный метод охлаждения магнита, применяемый сейчас на большинстве СП-магнитов для токамаков (кроме двух) и принятый для ИТЭР. Однако анализ практики их работы показывает явно недостаточную надёжность этих магнитов. Известно, что во время их работы и особенно во время испытаний их катушек произошло 18 аварий: пробоев внутри криостата, как правило, связанных с нарушением вакуума в нём [12—14]. Хотя причины их понятны и возможные способы устранения этой неприятности неоднократно предлагались [15, 16], однако они почему-то не используются ни на существующих магнитах, ни даже на ИТЭР. Кроме того, большая длина периметра катушки и кабеля в ней требует длины охлаждающих каналов около 500 м (или сложных промежуточных отводов). Хотя это всего в 1,5 раза длиннее каналов



Ввод гелия Рис. 3. Схема каналов для поперечного прокачного охлаждения



Рис. 4. Оптимальный вариант ТНЭ: 168 проводов ниобий—олово; $I_{\text{крит}} = 37 \text{ кA}$; $I_{\text{раб}}/I_{\text{крит}} = 0,7$

охлаждения в T-15, где с обеспечением потока гелия сложностей не было, тем не менее может оказаться, что интенсивность охлаждения магнита недостаточна, тем более, что нагрев магнита нейтронами пока не просчитан достаточно подробно.

Поэтому целесообразно рассмотреть возможность использования альтернативных способов охлаждения магнита с более высокой эффективностью.

Погружной (или, точнее, прокачной) способ может быть реализован в предложенной конструкции магнита сравнительно просто. Корпуса катушек должны быть сварены герметично. На их внутренних поверхностях и вдоль поверхностей всех бандажей, намотанных друг на друга, должны быть сделаны разводящие канавки. В бандажах на некотором расстоянии друг от друга должны быть сделаны поперечные (радиальные) отверстия, через которые хладагент должен проходить внутрь бандажа и омывать поверхность кабеля, проходя по 2 мм щели вокруг него между керамическими опорами, фиксирующими положение кабеля в бандаже подобно тому, как это сделано в ТОРЕ-СУПРА, где керамические бляшки между витками вставлены между витками кабеля. Такая система, показанная на рис. 3, позволит прокачивать гелий не вдоль, а поперёк витков катушки, что значительно снизит гидравлическое сопротивление, позволит использовать эжектора для увеличения потока хладагента вместо насосов и увеличит интенсивность охлаждения магнита. К тому же отводов хладагента и диагностики потребуется значительно меньше. Такой способ будет значительно предпочтительнее, особенно в случае работы при повышенной температуре при применении высокотемпературных СП (ВТСП).

На рис. 4 показан оптимальный вариант ТНЭ с прокачным охлаждением, кабелем в виде плоской скрутки резерфордовского типа, сложенной пополам в продольном направлении. Скрутка намотана субкабелями, состоящими из одного медного и шести ниобий-оловянных проводов. В этом варианте общее количество проводов 168. Критический ток в проводе при 12 Тл 220 А, т.е. суммарный критический ток 37 кА. В этом случае при 4,7 К и 12 Тл отношение $I_{\text{раб}}/I_{\text{крит}} = 0,7$. Изоляция кабеля расположена внутри кожуха.

ЗАЩИТНЫЙ ВЫВОД ЭНЕРГИИ

При использовании одноступенчатой изоляции в обмотке очень важным является вопрос защиты магнита при квенче (необратимом переходе в нормальное состояние) вследствие, например, нагрева переменным полем при срыве тока плазмы. При этом требуется достаточно быстро вывести из магнита огромный запас энергии — в нашем случае около 6 ГДж. Обычно магнит разряжается на внешнее сопротивление с такой скоростью, чтобы не допустить перегрева места, где начался переход в нормальное состояние. Однако в нашем случае системы с огромным запасом энергии даже вывод из каждой катушки по отдельности (как на Тор-Супра) сопряжён с достаточно высоким напряжением.

Действительно, общая индуктивность нашего магнита около 30 Гн, т.е. около 1,7 Гн у каждой катушки. Сечение меди в ТНЭ ДЕМО-ТИН ~0,9 см², т.е. примерно вдвое больше, чем в ТНЭ СП магнита T-15. Но рабочий ток в 5 раз больше, т.е. плотность тока в стабилизирующей меди в 2,5 раза больше и её разогрев при квенче магнита в 6 раз быстрее. И если допустимый нагрев 160 К достигался в СПобмотке на Т-15 за 104 с, то здесь он будет достигнут за 17 с. Вывод со скоростью 20 кА/17 с, т.е. 1,2 кА/с на 30 Гн, даёт около 36 кВ на всей обмотке, или около 2 кВ на каждой катушке. Очевидно, необходимо использовать вывод из каждой катушки по отдельности или лучше путём их «хороводного» соединения (как в Т-15), т.е. последовательного соединения 18 катушек с 18 гасящими сопротивлениями между ними, шунтированными быстродействующими замыкателями во время нормальной работы и быстро размыкаемыми при необходимости вывода энергии. Схема такого соединения показана на рис. 5. Середина каждого из выводных сопротивлений заземляется через ограничивающее сопротивление для симметризации выводного напряжения. В этом случае напряжение вывода составит ±1 кВ на каждой катушке. Это значительно меньше, чем принятое на ИТЭР выводное напряжение ±3,5 кВ. Но на ИТЭР сделана трехступенчатая изоляция (вокруг витков, вокруг радиальных панелей с каналами для кабеля и между всей обмоткой и корпусом, который значительно толще (70 мм и больше)), так что он воспринимает все нагрузки, действующие на катушку. В магните ДЕМО-ТИН для такого толстого кожуха нет места, и часть механических нагрузок приходится на саму обмотку. Поэтому для обеспечения её жёсткости и совместной работы с корпусом приходится отказаться от корпусной и межгалетной изоляции и положить её только на сами витки. Но, как показывает опыт Т-15, даже при выводе с напряжением ±1 кВ все выводы катушек должны быть изолированы не хуже самих катушек, т.е. по той же технологии импригнирования под давлением после откачки, которая обычно используется в самих катушках [9, 10]. К сожалению, это не сделано в ИТЭР и других работающих магнитах с принудительным охлаждением, в результате чего их надёжность ниже приемлемого уровня (известны 18 случаев пробоев внутри криостата на всех шести из существующих магнитов этого типа).

Очевидно, что при одноступенчатой изоляции необходимо дальнейшее снижение напряжения защитного вывода в 4—5 раз. Примерно 2—3-кратное снижение возможно за счёт использования нарастающего сопротивления, двух- или трёхступенчатого вывода или сглаживания начального пика напряжения ёмкостными цепочками. Но для большего снижения напряжения может быть использовано снижение напряжения за счёт тока, наведённого в корпусе и бандажах катушки. Их сопротивление в отсутствие межвитковой изоляции примерно $5 \cdot 10^{-5}$ Ом в каждой катушке и при выводе со скоростью 1,2 кА/с и 10 В/виток в корпусе наве-



Рис. 5. Схема защитного вывода энергии из магнита ТИН (показаны две из 18 одинаковых ячеек)

дётся ток около 200 кА, т.е. около 5% общего тока в катушке. Если между бандажами витков катушки проложить полоски меди толщиной 1—2 мм, то сопротивление всего сечения корпуса снизится до 10—6 Ом и менее (в зависимости от качества меди). При этом «внесённое» индуктивной связью сопротивление, шунтирующее обмотку катушки, будет в N^2 раз больше, но всё же в несколько раз меньше основных защитных сопротивлений, и по корпусу потечёт основная часть (около 80%) тока, а по выводным сопротивлениям лишь небольшая его часть. Так что напряжение вывода будет снижено в несколько раз и ток станет затухать в основном за счёт нагрева корпуса. Это позволит снизить напряжение на каждой катушке до примерно ±200 В на катушку, что позволит надёжно работать с одной только витковой изоляцией кабеля от его бандажа. Правда, перераспределение тока произойдёт не сразу из-за неидеальной связи витков катушки с корпусом. Но поскольку связь всё-таки довольно хорошая, это время будет меньше секунды и пик напряжения на сопротивлении R1 может быть срезан шунтирующей его RC-цепочкой.

После перераспределения тока начнётся нагрев всего магнита и лишь в небольшой степени кабеля ТНЭ. Температура магнита после защитного вывода достигнет примерно 60—80 К, и последующее охлаждение магнита может занять несколько дней, а заряжать его придётся очень медленно — 5—10 ч, так что для питания магнита будет достаточно одного источника тока 20 кА напряжением 25 В. При этом мощность нагрева корпуса магнита будет всего 1—2 кВ и легко может быть отведена рефрижератором. Для стационарного магнита ДЕМО-ТИН такой режим работы вполне приемлем. Такой способ защитного вывода тока нуждается в более детальном анализе, но, по-видимому, он поможет решить проблему вывода энергии в столь большом и напряжённом магните с весьма ограниченным сечением, доступным для размещения сверхпроводника и низкорезистивного материала для стабилизации. Важно заметить, что при этом основные защитные сопротивления только инициируют вывод, а выделение энергии в них незначительно. Поэтому они и шунтирующие их ключи могут быть расположены внутри криостата. Причём в качестве последних могут быть использованы просто СП-шины с нагревателями. Это позволит обойтись всего двумя токовводами.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТСП

Можно существенно повысить температурный запас магнита и компактность токонесущей части ТНЭ, а также упростить решение проблемы защитного вывода энергии из магнита, если вместо проводов ИТЭР использовать в такой же конструкции коммерчески доступную ВТСП-шинку шириной 4 мм и толщиной 0,1 мм (имеющую токонесущую способность 120—140 А при 70 К и более 1000 А при 4 К). Такая шинка может быть обмотана в 4—6 заходов и в 4—6 слоёв вокруг овальной или круглой медной трубки [17], размещённой внутри кожуха, как в варианте рис. 4. Охлаждение может осуществляться как потоком по трубке, так и по щели вокруг кабеля.

Это даст возможность магниту работать на проектных параметрах при температуре 10—20 К, когда для отвода выделяемого радиационного тепла необходимая мощность рефрижератора в 5 раз меньше, чем при 4 К, или получать 20—40% значения поля при 70 К, что существенно упростит многие задачи ДЕМО-ТИН (защита магнита от нейтронов, теплоизоляция обмотки и др.). Однако для этого надо провести ряд НИОКР по исследованию свойств и испытаниям самой ВТСП-шинки, её чувствительности к радиации, способов изготовления кабеля из неё, а также модельных и прототипных катушек. Предварительные работы в этом направлении ведутся в НИЦ «Курчатовский институт» [17]. Их целесообразно поддержать и расширять.

НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО СП-ПРОВОДА

Общее количество СП-провода, необходимого для тороидального магнита ДЕМО-ТИН, будет 70 MA·25 м = $1750 \cdot 10^6$ A·м. Его вес при использовании провода ИТЭР составляет примерно 24 т, т.е. около 20% провода для ИТЭР, выпускаемого в России. Какова будет стоимость такого провода для внутреннего использования после окончания его производства для ИТЭР (через два года, после выпуска провода за Россию и Европу), предсказать трудно, но сделать его можно на ЧМЗ менее чем за полгода.

Если делать ТНЭ с ВТСП-шинкой при её сегодняшней стоимости (30 \$/м шинки с критическим током 120 A при T = 75 K или около 700 A при T = 10-20 K), то её надо (2-2,5)10⁹ A·м/(1000 A) = 3·10⁶ м, т.е. на 90 млн \$, что по сравнению с общей стоимостью проекта ДЕМО-ТИН не так уж много, тем более, что можно ожидать снижения цены в ближайшие 3—5 лет в несколько раз. Но объём производства ВТСП-шинки в мире в настоящее время составляет всего около 5000—10 000 м в год, и для производства ва нужного количества ВТСП-шинки он должен быть увеличен в 100—200 раз.

ПОЛОИДАЛЬНЫЕ ОБМОТКИ

Индуктор, по-видимому, можно сделать из такого же ТНЭ потому, что количество кабеля для него существенно меньше и разработка специального ТНЭ вряд ли целесообразна. Но в индукторе витковая и межгалетная изоляция должна быть сделана, поскольку для пробоя и наращивания тока нужно напряжение не менее 10 В/виток, а витков даже в секциях индуктора достаточно много. Общий ток в шести секциях индуктора 70 MA, по 5—10 MA на секцию, т.е. 400—800 витков в секции с напряжением до 8 кВ. Возможно, его придётся разделить на большее число параллельно соединённых секций.

Разрушение изоляции давлением поля даже 14 Тл, возможно, не столь опасно, как в тороидальном магните, так как радиус индуктора 0,5 м и давление поля удерживается в основном кривизной витка. Кроме того, можно организовать дополнительное обжатие индуктора, если после его введения внутрь собранной тороидальной обмотки в 20-миллиметровый зазор между ними (хотя он может быть и меньше 10—15 мм) вставить двойные пилообразные рейки с пологими зубьями навстречу друг другу. Их можно использовать и для продольного преднатяга индуктора, при котором они, наползая зубьями друг на друга, будут становиться толще, плотно заполняя зазор между индуктором и тороидальным магнитом для передачи действующих на них встречных радиальных усилий.

Технология намотки индуктора обычна. Что же касается конструкции полоидальных обмоток, она не является критической точкой проекта. Их ТНЭ, видимо, можно сделать из провода NbTi с облегчённой оболочкой типа показанной на рис. 2, *a* и также путём обычной технологии обмотки. Но можно использовать и ТНЭ предложенной конструкции, но с ниобий-титановыми проводами, чтобы не осваивать две разных технологии.

ПОПЕРЕЧНЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КАТУШКИ

Опрокидывающие моменты, действующие на тороидальные катушки от взаимодействия с вертикальным полем, тоже могут быть достаточно велики и достигать около 10 МН на каждую из катушек в противоположные стороны вверху и внизу. Но эта оценка, видимо, сильно завышена, так как она получена для однородного вертикального поля. В диверторной конфигурации полоидальная сила может быть существенно меньше и разнонаправленной на соседних участках катушки из-за разного направления вертикальных полей. Так что она должна быть сосчитана после окончательного выбора конфигурации полоидальных полей численными методами для разных режимов.

Также необходима оценка сил, действующих на обмотки и камеру при срывах тока плазмы. Но силы поперёк плоскости и силы на полоидальные катушки в нештатных режимах меньше рассмотренных основных сил, действующих на катушки тороидального магнита, и могут быть восприняты соответствующим раскреплением внешних ног тороидального магнита и полоидальных катушек, если наличие шести инжекторов и бланкета не помешает этому. Так что конструкцию такого раскрепления надо рассматривать совместно с другими узлами установки и после расчёта сил при срыве тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание сверхпроводящего магнита необходимых размеров на поле 5 Тл на оси с радиусом 2,75 м и максимальным полем на обмотке 12 Тл — сложная, но разрешимая задача. Принципиальных проблем в её решении, видимо, нет. Однако она требует предварительных серьёзных НИОКР и внимательного просчёта всех элементов конструкции. В том числе нужны расчёты теплопритока к СП-обмотке от потока нейтронов, которые могут показать необходимость увеличения запаса по температуре, определяющего допустимый запас по току, т.е. отношение рабочего тока к критическому, а возможно, и перехода к использованию ВТСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ivanov D.P., Keilin V.E., Klimenko E.Y. et al. IEEE Transactions on Magnetics 1977, vol. 13, № 1, p. 694.
- 2. Иванов Д.П., Кейлин В.Е., Стависский Б.А., Черноплеков Н.А. Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 3, с. 171.
- Britousov N.N., Vertiporokh A.N., Ivanov D.P. et al. In: 16th Symposium on Fusion Technology. London, UK, 3—7 September, 1990, Proceedings, North-Holland: Flsevier Sci Publ B.V., 1991, p. 597.
- 4. Wu Y., EAST Team. Experience of operating of EAST superconducting magnet. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, vol. 20(3), p. 431—437.
- Lee G.S., Kwon M., Doh C.J. et al. Design and construction of the KSTAR tokamak. Nucl. Fusion, 2001, vol. 41(10), p. 1515—1523.
- 6. **Pradhan S.** SST-1 toroidal field magnet tests: some results and lessons learnt. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, p. 9501804.
- 7. Barbero E., Batisto R., Bellesia B. et al. Status of F4E procurement of radial plate prototypes for the ITER TF coils. IEEE Transections on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, № 3, p. 4202704.
- 8. Hamada K., Nunoya Y., Izona T. et al. Preparation for the ITER central solenoid conductor manufacturing. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, № 3, paper 4203404.
- 9. Bruzzone P., Review of design aspects for high current Nb₃Sn superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, № 3, p. 2036—2041.
- 10. Bruzzone P. Report for EFDA, WP-11-DAS-PLS-10. January, 2012, EFDA, TDM Server.
- Bruzzone P., Sedlak K., Stepanov B. High current superconductors for DEMO. Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, p. 1564—1568.
- 12. Ivanov D.P., Kolbasov B.N., Lelekhov S.A. et al. Qualitative analysis of accidents possible in ITER magnet. Plasma Dev. Oper., 1999, vol. 7, № 3, p. 205—217.
- 13. **Ivanov D.P.** Insulation of the leads for force-cooled SC magnets. Presentation at the 4th IAEA TM on Steady-State Operation in Magnetic Fusion Devices. Ahmedabad, India, 2005. Proceeding on CD.
- 14. Weng P.D. Report at the First ITER MRAG Meeting. Cadarache, Jan. 2008.
- 15. Ivanov D.P. Report for the Expert Group on ITER Magnet. Cadarache, Jan. 2007.
- 16. Ivanov D.P., Anashkin I.O., Khvostenko P.P., Kolbasov B.N., Lelekhov S.A., Nishimura A., Oh Y.K., Pan W.J., Pradhan S.S., Sharma A.N., Song Y.T., Weng P.D. Reliability of force cooled superconducting magnets for fusion. — IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, № 3, p. 4200604.
- 17. Novikov M.S., Keilin V.E., Novikov S.I. Preparation and experimental investigation of heavy-current transposed HTS conductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, vol. 23, № 3, p. 4800604.



Денис Петрович Иванов. к.ф.-м.н., в.н.с.. ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР, трёхкратный лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт». пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Россия Ivanov DP@nrcki.ru denis.ivanov30@mail.ru

Борис Николаевич Колбасов, с.н.с., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Россия Kolbasov_BN@nrcki.ru b.kolbasov@yandex.ru



Игорь Олегович Анашкин, начальник лаборатории; НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Россия Anashkin_IO@nrcki

Статья поступила в редакцию 25 июня 2014 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 3, с. 5—14.