УДК 621.039.623, 533.9.082.74, 519.688 РАЗРАБОТКА СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА С ПРОГРАММНЫМ ВЫВОДОМ ТОКА ПЛАЗМЫ БЕЗ ЕГО РЕВЕРСА В ИНДУКТОРЕ ДЛЯ ТОКАМАКА КТМ

В.Н. Докука¹, Р.Р. Хайрутдинов¹, Э.Н. Хайрутдинов¹, В.Ф. Андреев¹, А.М. Ли², Б.Ж. Чектыбаев³, Д.А. Ольховик³

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия ²Томский политехнический университет, Томск, Россия

³Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

В статье представлены результаты апробирования сценариев разряда, разработанных с применением кода ДИНА, на токамаке КТМ в ходе осенне-зимней кампании 2021 г. Качественное отличие разработанных сценариев заключается в увеличении тока плазмы и длительности разряда при неизменной стадии пробоя на напряжении обхода 6 В, а также наличии программной стадии снижения тока плазмы перед завершением разряда. Помимо этого, были учтены технологические ограничения в виде отсутствия реверсирования тока в обмотке индуктора на протяжении разряда и минимизации реверсирования тока в обмотках управления в зоне околонулевых токов. Проведённые работы в 2021 г. стали следующим значительным шагом на пути по выводу установки КТМ на проектные параметры.

Ключевые слова: токамак, сценарий, плазма, ток, плазмо-физический код ДИНА, КТМ.

DEVELOPMENT OF A DISCHARGE SCENARIO WITH SOFTWARE OUTPUT OF THE PLASMA CURRENT WITHOUT REVERSE IN THE INDUCTOR FOR THE KTM TOKAMAK

V.N. Dokuka¹, R.R. Khayrutdinov¹, E.N. Khayrutdinov¹, V.F. Andreev¹, A.M. Lee², B.Zh. Chektybayev³, D.A. Olkhovik³

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³Institute of Atomic Energy of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

The article presents the results of testing the scenarios of discharge developed and verified using the DINA code on the KTM tokamak during the autumn-winter campaign of 2021. The qualitative difference between the developed scenarios is an increase in the plasma current and discharge duration with a constant breakdown stage at a bypass voltage of 6 V, as well as the presence of a software stage of reducing the plasma current before the discharge is completed. In addition, technological limitations were taken into account in the form of the absence of current reversal in the inductor winding during the discharge. and minimization of current reversal in the control windings in the zone of near-zero currents. The work carried out in 2021 was the next significant step towards bringing the KTM unit to design parameters.

Key words: tokamak, scenario, plasma, current, DINA plasma-physical code, KTM.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-69-75

введение

В ходе осенне-зимней экспериментальной кампании 2021 г. на токамаке КТМ был апробирован сценарий удержания плазмы с помощью электромагнитной системы КТМ без реверса тока в индукторе. Расчёт сценария производился с использованием плазмофизического кода ДИНА [1—4]. В первую очередь расчёты были направлены на возможность увеличения тока и увеличение длительности плазменного разряда при неизменной начальной стадии, рассчитанной с использованием кода TRANSMAK [7], с напряжением в момент пробоя 6 В. Этот сценарий пробоя зарекомендовал себя стабильностью получения плазмы в установке КТМ [4]. Для уменьшения возможности повреждения внутрикамерных элементов установки в обсуждаемый сценарий включена стадия программного снижения тока плазмы и завершения плазменного разряда токамака КТМ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ КАМПАНИИ. ПОЛОИДАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТОКАМАКА КТМ. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЯМ НА ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ

Одной из особенностей КТМ является наличие подвижного диверторного устройства («диверторного стола»), служащего для размещения сменных элементов, воспринимающих тепловой и корпускулярный потоки со стороны плазмы. Ввиду особенностей конструкции токамака в штатном режиме невозможно прямое измерение тока плазмы, так как внутренний пояс Роговского опоясывает и диверторное устройство. Полоидальная система токамака КТМ состоит из односекционного индуктора и шести обмоток управления положением и формой плазмы. Пассивные стабилизирующие витки выполнены из меди. Параметры токамака КТМ приведены в статьях [4, 5]. Экспериментальная кампания осень—зима 2021 г. проводилась с учётом дополнительных условий:

— внутри вакуумной камеры в обход диверторного устройства был проложен дополнительный пояс Роговского для регистрации сигнала тока плазмы. Его сигнал был заведён на АЦП штатного пояса Роговского (ПРН);

— источники питания обмоток управления PF1—PF6 имеют особенность поведения при приближении значений протекающего через них тока к нулю. Величина тока плохо контролируется вне зависимости от наличия команды перехода тока через нулевое значение;

— подключённые к системе регистрации диагностики токамака КТМ, задействованные в ходе кампании, не позволяют провести анализ состояния камеры, величины натекания газа в камере и его влияния на количество примесей в плазме с достаточной точностью.

Эти ограничивающие факторы вносили дополнительную сложность при проведении расчётов сценария разряда. Все разряды были получены при одинаковом тороидальном поле TF, равном 0,9 Тл. Предельные параметры электропитания полоидальной системы токамака КТМ в ходе кампании, связанные с предельными возможностями трансформаторов ИП, техническими ограничениями и предельными уровнями напряжений, приведены в таблице.

Трансформатор	Id, кА	Предельное выпрямленное напряжение Ud, В
ИП CS	15	±1500
ИП PF1	±15	± 400
ИП PF2		
ИП PF3	±3	_
ИП РF6		
ИП PF4 ИП PF5	±30	_

Ограничения на электропитание обмоток ЭМС КТМ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ

Для весенней кампании 2021 г. была поставлена задача разработать сценарий разряда с получением значения тока плазмы более 150 кА и увеличением длительности разряда до момента полного расходования запаса полоидального потока индуктора, используя уже отработанный сценарий начальной стадии разряда, подготовленный в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова с использованием кода TRANSMAK [6]. Сценарий начальной стадии завершается к 26-й мс формированием квазикруглой плазмы с током плазмы 50— 55 кА. Дальнейшее развитие разряда (ввод и вывод тока плазмы) рассчитывалось с использованием кода ДИНА и учётом данных, полученных в расчёте начальной стадии.

В расчётной модели вакуумная камера токамака КТМ представлена в виде аксиально-симметричной однослойной оболочки, материал которой нержавеющая сталь. Внутреннее и внешнее опорные кольца диверторного устройства, верхняя поверхность диверторного устройства предполагались электрически замкнутыми в тороидальном направлении. Сценарий разряда определяется заданием ряда параметров плазмы, включая эволюцию границы плазмы в определённые моменты развития разряда, динамику плотности плазмы и т.д. При моделировании развития сценария разряда использовался скейлинг T-11 [7]. При разработке сценария настраивалась программа напряжения в индукторе. В ходе предыдущих экспериментальных кампаний в процессе моделирования сценария рассчитаны сценарий тока для обмоток полоидального поля и эволюция тока плазмы с учётом программных данных положения и формы плазменного

шнура. На рис. 1 показаны динамика напряжений в обмотке индуктора, полоидальный поток от индуктора и всех обмоток, а также полоидальный поток плазменного шнура. На момент окончания разряда ток I_{CS} и полоидальный поток Ψ_{CS} от индуктора близки к нулю. На рис. 2 показаны ток плазмы и положение магнитной оси в процессе развития разряда. При этом максимальная величина тока плазмы достигает величины ~150 кА.



индуктора (б) и всех обмоток (в), полоидальный поток в плазме (г) магнитной оси (в, г) В весеннюю кампанию 2021 г. на установке КТМ был проведён ряд разрядов с использованием программных токов данного сценария. В одном из таких экспериментов примерно через 100 мс после пробоя плазма срывается вниз в направлении диверторного устройства. Для последующих разрядов были внесены изменения в сценарий токов в обмотках PF5 и PF1. Отказ от реверса в обмотке PF5 позволил предотвратить уход плазмы вниз. Но поскольку далее в процессе развития разряда наблюдалось движение плазмы в направлении верхней крышки ВК, было предложено также отказаться от реверсирования тока в обмотке PF1. В разряде № 4397 максимальная величина тока плазмы достигает 150 кА. При этом попытка стабилизировать уход плазмы вверх, добавив реверсный ток в обмотке PF1 на 100 мс после пробоя, позволила увеличить длительность разряда, но максимальный ток плазмы не превысил 120 кА. На рис. 3 показано сравнение

программных токов в обмотках управления с токами, полученными в эксперименте № 4397.



Рис. 3. Токи в обмотках управления PF1—PF6: *a*—*e* — *I*_{PF1}—*I*_{PF6}; — — кривая программных токов; - - — токи, полученные в эксперименте

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4



Рис. 4. Ток в обмотке индуктора CS (*a*), ток плазмы (б) и положение магнитной оси (*в*, *г*): — — кривая программных токов; — — токи, полученные в эксперименте

На рис. 4 показано сравнение сценарных и экспериментальных данных тока индуктора, а также положения и тока плазмы.

Подводя краткий итог, отметим, что на основе разработанного сценария с учётом внесённых изменений на установке КТМ получен плазменный разряд с током ~150 кА и длительностью ~250 мс, однако стоит отметить неконтролируемый уход плазмы вверх (см. рис. 4, г). Отметим, что в весенней кампании отсутствовало прямое измерение тока плазмы. С целью проверки повторяемости разрядов в осенне-зимнюю кампанию предполагалось выполнить эксперименты со сценарием, использованным в разряде № 4397. Экспериментальные токи указанного разряда были выбраны в качестве базовых для расчёта «улучшенного» сценария без реверсирования тока в индукторе в ходе второй кампании 2021 г.

РАСЧЁТ И АПРОБАЦИЯ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СЦЕНАРИЯ РАЗРЯДА № 4397 БЕЗ РЕВЕРСИРОВАНИЯ ТОКОВ В ИНДУКТОРЕ И ОБМОТКАХ УПРАВЛЕНИЯ РF1 И PF5

В осенне-зимнюю кампанию была поставлена задача разработать сценарий разряда с превышением током плазмы величины 150 кА и реализацией стадии вывода тока плазмы, используя в качестве прототипа токового сценария экспериментальные токи разряда № 4397, не допуская реверса тока в индукторе. Поскольку система управления источниками питания обмоток ввиду особенностей реализации перехода тока через нуль осуществляет данный процесс в неконтролируемом режиме, принято решение не допускать реверса тока в обмотках управления PF1 и PF5.

Расчёт сценария выполнен с использованием полуторамерного эволюционного кода ДИНА при задании сценариев плотности и положения магнитной оси плазмы. Динамика тока плазмы определялась сценарием напряжения на обмотке индуктора. Остальные сценарные токи следуют данным, полученным в разряде № 4397. Примерно к 200-й мс разряда ток в индукторе приближается к нулю, и сценарное напряжение полагается равным нулю. На рис. 5 показаны ток плазмы и положение магнитной оси модернизированного сценария.



Рис. 5. Ток плазмы (а), малый радиус плазмы (б), положение магнитной оси (в, г)

16 20 б а 14 15 12 10 $I_{\rm p}, \times 10^4 \text{ kA}$ 10 Ics, KA 8 6 5 4 2 0 0 -5 -2 0 0,1 0,2 0.3 0,4 0.5 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Время, с Время, с Рис. 6. Токи в индукторе (а) и плазме (б): — — № 4413; — — 4414; — — 4415; — — 4416; -— 4417; **—** — 4418; **-**4420 (*a*, б); ---- -- 4397 (*a*) и 4411 (б); ---- 4411 (только *a*) б 6 16 а 14 5 12 4 10 IPF1, KA 8 IPF2, KA 3 6 2 4 2 1 0 -2, 0 0,5 0,1 0,2 0,3 0,4 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Время, с Время, с Рис. 7. Ток в обмотках управления PF1 (*a*) и PF2 (*б*): ---- № 4397; ---- - 4411; - - 4413; - - 4414; - - 4415; -4416; **—** — 4417; <u>4418;</u> -442015 0,5 а б 0 10 -0,55 IPF3, KA IPF4, KA $^{-1}$ 0 -1,5-5 -2-10-2,5 0 0,1 0,2 0.3 0,4 0,5 0,1 0.2 0.3 0.5 0 0,4 Время, с Время, с Рис. 8. Ток в обмотках управления РF3 (*a*) и РF4 (б): ---- № 4397; ---- 4411; ---- 4413; ---- 4414; ---- 4415; - 4418; --4420 0 1,5 б а 1 -2 -4 0,5 IPF6, KA -6IPF5, KA 0 -8 -0,5-10-1 -12 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Время, с Время, с Рис. 9. Ток в обмотке управления РF5 (а) и РF6 (б): ---- № 4397; ---- - 4411; --- 4413; --- 4414; --- 4415; ----

На основе улучшенного токового сценария разряда № 4397 в осенне-зимнюю кампанию проведено 11 экспериментальных разрядов № 4413—4421, 4424 и 4425. На рис. 6—9 показана динамика токов в

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4

4416; <u>4417;</u> <u>4418;</u> <u>4420</u>

обмотках в этих разрядах. Для сравнения приведены токи базового разряда № 4397 и его повторной реализации разряда № 4411. На рис. 6—9 показаны также токи в плазме, полученные в разрядах осеннезимней кампании, для сравнения к ним добавлен ток из разряда № 4411. Напомним, что в осеннезимнюю кампанию проводилось прямое измерение тока плазмы. В разрядах № 4414—4417 отмечается устойчивый выход на ток плазмы, превышающий 165 кА длительностью до 350 мс, исключая разряд № 4416 с длительностью 260 мс, в котором максимальная величина тока плазмы достигала величины 186 кА. В разрядах № 4418 и 4420, по-видимому, не удалость завершить стадию формирования плазменного шнура. Анализируя данные с датчиков напряжения и тока обмоток в этих двух импульсах, можем предположить, что на стадии пробоя произошло нарушение синхронизации в системе источников питания, повлекшее изменение конфигурации магнитного поля, что привело к прекращению разряда. Следует подчеркнуть, что данные эксперименты проведены без использования системы управления положением и током плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для весенней кампании 2021 г. был разработан сценарий разряда без реверсирования тока в индукторе. На установке КТМ был проведён ряд разрядов с использованием программных токов данного сценария. С учётом ряда внесённых изменений на основе разработанного токового сценария на установке КТМ получен плазменный разряд № 4397 с током ~150 кА и длительностью до 250 мс. Для осеннезимней кампании 2021 г. был разработан «улучшенный» сценарий разряда без реверсирования тока в индукторе с выходом на ток плазмы не менее 150 кА и последующим выводом тока плазмы, используя в качестве прототипа сценарных данных экспериментальные токи разряда № 4397. Поскольку система управления источниками питания обмоток ввиду особенностей реализации перехода тока через нуль осуществляет данный процесс в неконтролируемом режиме, принято решение не допускать также реверса тока в обмотках управления PF1 и PF5. С учётом указанных ограничений был пересмотрен сценарий разряда № 4397, и его модернизированная версия была использована в начале кампании для проверки повторяемости экспериментов. Отметим, что в осенне-зимнюю кампанию на установке КТМ обеспечена возможность прямого измерения тока плазмы. По данному сценарию было проведено 11 разрядов, примерно половина из них оказались удачными. Стоит отметить, что «неудачные» разряды, в основном, стали следствием особенностей технологического обеспечения токамака КТМ. Полученный токовый сценарий обеспечивал устойчивый выход на токи плазмы, превышающие 165 кА при длительности разряда до 350 мс.

Проведённые в 2021 г. расчётные и экспериментальные исследования стали определённым шагом на пути вывода установки КТМ на проектные параметры: полученный сценарий позволил отработать этап вывода тока плазмы для реализации последующих сценариев с выходом тока на «плато», увеличением тока плазмы и длительности разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. Comput. Physics, 1993, vol. 109, p. 193—201.
- 2. Азизов Э.А., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Минеев А.Б. Разработка и анализ программных сценариев разрядов в плазме казахстанского материаловедческого токамака КТМ. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 1, с. 12—25.
- 3. Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Кавин А.А. Синтез и моделирование системы магнитного управления плазмой в токамаке КТМ. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 1, с. 12—25.
- 4. Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. Расчётные исследования разрядов плазмы в токамаке КТМ в осеннюю кампанию 2019 г. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 2, с. 57—66.
- Azizov E.A., Dokuka V.N., Shestakov V., Shkolnik V., Tazibayeva I., Velikhov E. et al. Kazakhstan tokamak for material testing. — Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11(1), p. 39—55.
- 6. Belyakov V.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Vasiliev V.V. Plasma initiation stage analysis with transmak code. Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, p. 193.
- 7. **Мережкин В.Г., Муховатов В.С.** Электронная теплопроводность и диффузия в токамаке. Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 463—466.





Владимир Николаевич Докука, ведущий инженер, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия v.dokuka@mail.ru

Эдуард Наилевич Хайрутдинов, инженер 2-й категории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия

eduardkhayrutdinov@gmail.com

Алексей Михайлович Ли,

программист; Национальный

исследовательский Томский

ситет, 634050 Томск, пр-т

универ-

политехнический

Ленина 30, Россия

lee@tpu.ru





Рустам Рашитович Хайрутдинов, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия khayrutd@mail.ru

Валерий Филиппович Андреев, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия Andreev_VF@nrcki. ru

Бауржан Жамбулович Чектыбаев, начальник отдела термоядерных исследований; Институт атомной энергии НЯЦ РК, 071100 Курчатов, ул. Бейбит атом 10, ВКО, Республика Казахстан chektybaev@nnc.kz



Дмитрий Анатольевич Ольховик, начальник комплекса главный инженер токамака КТМ; Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, Институт атомной энергии НЯЦ РК, 071100 Курчатов, ул. Бейбит атом 10, ВКО, Республика Казахстан Olkhovik@nnc.kz

> Статья поступила в редакцию 5 июля 2022 г. После доработки 3 октября 2022 г. Принята к публикации 5 октября 2022 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 69—75.