УДК 621.3.031.8

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ

Д.Б. Зарва¹, А.А. Дериглазов², Э.Г. Батырбеков^{1, 3}, И.Л. Тажибаева^{1, 3}, В.М. Павлов², А.М. Ли², А.А. Мезенцев², С.В. Меркулов², Ю.Н. Голобоков²

¹Республиканское государственное предприятие «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Республика Казахстан

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия ³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Системы импульсного электропитания установок типа токамак относятся к основным технологическим системам и предназначаются для создания требуемых сценариев изменения токов в обмотках электромагнитной системы. От точности реализации данных сценариев напрямую зависят возможность получения плазменного пробоя и конечные параметры получаемой плазмы. Учитывая уникальность каждой из сооружаемых в мире установок, а также установленную мощность применяемого электротехнического оборудования при комплектации их источников питания, с уверенностью можно констатировать, что сооружение подобных энергетических комплексов и их систем управления, оптимизация их электротехнических параметров и дальнейшая безаварийная эксплуатация являются актуальными задачами на пути освоения технологий управляемого термоядерного синтеза. В данной работе описаны система импульсного электропитания казахстанского материаловедческого токамака КТМ, система цифрового управления её силовым преобразовательным оборудованием, электротехнические решения, принятые при разработке системы импульсного электропитания токамака КТМ, и результаты проведённых испытаний некоторого оборудования и комплектующих. Испытания показали достаточную эффективность принятых электротехнических решений и возможность их использования при реализации систем импульсного электропитания токамаков малой и средней мощности.

Ключевые слова: токамак КТМ, импульсное электропитание, полупроводниковые преобразователи, система управления и диагностики преобразовательного оборудования, сильноточные прерыватели постоянного тока, распределение токов по параллельно соединённым полупроводниковым приборам.

ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF TOKAMAK KTM PULSE POWER SUPPLY SYSTEM

D.B. Zarva¹, A.A. Deriglazov², E.G. Batyrbekov^{1, 3}, I.L. Tazhibayeva^{1, 3}, V.M. Pavlov², A.M. Li², A.A. Mezentsev², S.V. Merkulov², Yu.N. Golobokov²

¹Republican State Enterprise «National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», Kurchatov, Republic of Kazakhstan ²National Research Tomsk Polytechnical University, Tomsk, Russia ³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Pulsed power supply equipment relates to the basic technological systems. Its goal is to fulfill the required current change scenarios in the magnetic coils. These scenarios realization accuracy has direct impact on the possibility to obtain plasma breakdown and the required outcome parameters. Considering the uniqueness of each facility under construction in the world, as well as installed capacity of applied electrotechnical equipment in the setting of their power supply sources assembly — it is possible to state confidently that the construction of similar power complexes and their control systems, optimization of their electrotechnical parameters and further accident-free operation is one of the vital tasks in mastering controlled thermonuclear fusion technologies. This paper describes tokamak KTM pulse power supply system, digital control system for its forceful converting equipment, electrotechnical solutions adopted under development of tokamak KTM pulse power supply system and findings discovered at the testing of some equipment and its components. The testing performed demonstrated high efficiency of the adopted electrotechnical solutions and possibility of their application in implementation of pulse power supply systems for small and medium sized tokamaks.

Key words: tokamak KTM, pulse power supply, semiconductor converters, control and diagnostics system of transforming equipment, high-current circuit-breakers, distribution of currents in parallel-connected semiconductor devices.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-59-70

введение

Токамак КТМ, сооружаемый в г. Курчатове (Республика Казахстан) в настоящее время, — единственная в мире «мегаамперная» установка (ток плазмы I = 0,75 MA), предназначенная для испытания материалов и технологий в штатных и аварийных (режим срыва плазмы) условиях работы термоядерных

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2

реакторов с аспектным отношением A = 2, что позволит проводить исследования физики удержания плазмы в пограничной области между сферическими (A < 2) и классическими (A > 2) токамаками [1—3].

Реализация плазменного разряда на электрофизической установке типа токамак становится возможной и напрямую связана с возможностью реализации сложных сценариев изменения токов в обмотках электромагнитной системы. Для осуществления указанных сценариев изменения токов в обмотках токамака КТМ создаётся соответствующая система их импульсного электропитания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Создание систем импульсного электропитания электрофизических установок типа токамак является сложной научно-технической задачей, поскольку в каждом конкретном случае необходимо решить множество проблем, связанных с большими объёмами и резкими изменениями характера и величины потребляемой мощности, ограничениями, накладываемыми питающей электросетью, ограничениями, связанными с параметрами нагрузки (в данном случае это обмотки электромагнитной системы токамака), необходимостью минимизации пульсаций тока и напряжения на выходе источников питания, необходимостью снижения влияния источников питания на электрическую сеть, необходимостью высокоточного регулирования и стабилизации токов в нагрузке при больших значениях скорости их изменения и многими другими.

Вместе с этим в настоящее время не существует типовых промышленных образцов электротехнических комплектующих и преобразовательного оборудования, требуемого для компоновки источников импульсного электропитания токамаков, что вызывает необходимость разработки нестандартных образцов и решений, удовлетворяющих требованиям конкретной поставленной задачи. Учитывая установленную мощность электрооборудования, а также количество полупроводниковых элементов, использующихся для его компоновки, актуальным становится вопрос минимизации возможности и последствий аварийных ситуаций, оптимизации нагрузочных и перегрузочных характеристик, а также вопрос необходимости оперативной диагностики преобразовательного оборудования.

Исходными данными, накладывающими императивные требования к системе импульсного электропитания обмоток электромагнитной системы токамака, являются сценарии изменения токов в них во время базового «инженерного» плазменного сценария разряда установки, а также основные параметры самих обмоток электромагнитной системы. В табл. 1 приведены основные параметры обмоток электромагнитной системы КТМ, измеренные непосредственно после сборки установки, а также расчётные параметры системы подводящих шинопроводов постоянного тока.

Пара- метр/обмотка	Число витков	I _{max} , A	$U_{ m max},{ m B}$	<i>R</i> обмотки, мОм	<i>L</i> обмотки, мГн	Запасённая энергия W, кДж	<i>R</i> шинопрово- да, мОм
PF1	40	18 000	1000	8,90	2,60	421,2	1,81
PF2	8	18 000	1000	3,80	0,37	59,94	1,81
PF3	40	10 000	1000	25,80	11,00	550	1,45
PF4	48	30 000	1000	6,70	3,10	1395	0,78
PF5	16	30 000	1000	7,61	1,40	630	0,73
PF6	40	10 000	1000	25,70	11,10	555	1,56
HFC+	36	3000	1000	106,60	8,80	39,6	3,51
HFC-	36	3000	1000	105,90	8,80	39,6	3,51
CS	423	30 000	3300	30,50	11,40	5130	0,60
TF	80	60 000	1000	6,70	8,00	14 400	0,30

Таблица 1. Основные параметры обмоток электромагнитной системы токамака КТМ и системы подводящих шинопроводов постоянного тока

Сечение установки КТМ и расположение обмоток катушек в пространстве показаны на рис. 1. Обозначения на рисунке: PF1—PF6 катушек полоидальных обмотки полей, CS — обмотка центрального соленоида, HFC +/- — верхняя и стабилизации нижняя обмотки быстрых вертикальных смещений плазмы, Passive coils — обмотки пассивной стабилизации, Transport Device транспортно-Sluice шлюзовое устройство, TF — обмотка тороидального поля.



СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА КТМ

Учитывая, что в процессе плазменного разряда установки КТМ расчётная мощность, потребляемая из сети, не превышает 126 MBA, а мощность короткого замыкания электросети, приведённая к напряжению 220 кВ на территории электрической подстанции КТМ, составляет S = 1,332, ГВА-подключение системы импульсного электропитания установки КТМ совместно с системой дополнительного ВЧ-нагрева плазмы реализовано без использования промежуточных накопителей энергии, напрямую к питающей электросети через понижающий головной трансформатор подстанции КТМ 220/10 кВ — ТРДЦНМ-100000/200000/220/10У1 мощностью 100 MBA. Номинальная мощность трансформатора выбрана исходя из импульсного характера работы установки КТМ, а также перегрузочной способности указанного трансформатора.

Токи в обмотках электромагнитной системы установки КТМ формируются при помощи девяти источников импульсного электропитания, представляющих собой группу из двух понижающих трансформаторов мощностью 31,2 МВА на напряжение 10/0,7 кВ (на рис. 2 Т1 и Т2), семи понижающих транс-<u>Сеть 220 кВ 3:3 - 1,332 ГВА</u>



Рис. 2. Структурная схема системы импульсного электропитания установки КТМ и системы её цифрового управления (кроубар — шунтирующий вентиль)

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2

форматоров мощностью 6,3 MBA на напряжение 10/0,4 кВ (на рис. 2 T3—T9), полупроводникового преобразовательного комплекса, состоящего из 30 тиристорных преобразователей мощностью 15 МВт каждый (на рис. 2 TП), полупроводникового ключа-прерывателя на ток до 30 кА в источнике питания обмотки центрального соленоида, инвертора напряжения частотой 1 кГц, мощностью 3 МВт в источнике питания обмотки стабилизации быстрых вертикальных смещений плазмы (на рис. 2 ОИ), 10 уравнительных реакторов на токи до 30 кА (на рис. 2 УР), а также иного электротехнического оборудования. В табл. 2 приведены основные электротехнические характеристики источников импульсного электропитания установки КТМ.

Источник пита-	Коэффици- ент пульса- ций	Параметры ИП		Структура	Характеристики по	Тип и количество полупро-
ния (111)		I _{max} , кА	U _{max} , кВ	15 51	управляемости	водниковых приборов
ИП обмотки тороидального поля TF	q = 1% (k = 12)	60	1	Модульная, четыре преобразователя (ТП)	Полностью управляе- мый, только выпрями- тельный режим	Тиристор SCR 1200/18, 144 шт.
ИП обмотки центрального соленоида CS	<i>q</i> = 1% (<i>k</i> = 12)	±30	3	Модульная, восемь пре- образователей (ТП) — ключ-прерыватель по- стоянного тока	Полностью управляе- мый с реверсированием тока в совместном ре- жиме управления	Тиристор SCR 1200/18, 288 шт. в ТП. Тиристор SCR 1200/18, 102 шт., диод 1500/16, 60 шт. в ключе- прерывателе
ИП обмотки полоидального поля PF1	q = 1% (k = 12)	±15	±0,6	Модульная, четыре пре- образователя (ТП) вклю- чены по встречно-		Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.
ИП обмотки полоидального поля PF2	_"_	_"_	_"_	параллельной схеме, конструктивно два ТП на источник	жиме управления	Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.
ИП обмотки полоидального поля PF3	_"_	_"_	_"_		_"_	Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.
ИП обмотки полоидального поля PF6		_"_	_''_	_"_	_"_	Тиристор SCR 1200/18, 72 шт.
ИП обмотки полоидального поля PF4	_"_	±30	_''_	Модульная, четыре пре- образователя (ПП) вклю- чены по встречно-	_"_	Тиристор SCR 1200/18, 144 шт.
ИП обмотки полоидального поля PF5		_"_	_"_	параллельной схеме, конструктивно четыре ТП на источник		Тиристор SCR 1200/18, 144 шт.
ИП обмотки быстрого управ- ления HFC	q = 4,0% (k = 6) в звене посто- янного тока	±3	±1	Модульная, два преобра- зователя (ТП) включены последовательно, кон- структивно два ТП на источник	Полностью управляе- мый, инвертор напря- жения 1 кГц, с ШИМ- управлением	Тиристор SCR 1200/18, 36 шт.
				Моноблок (инвертор напряжения)		IGBT-транзистор 2400/17, 12 шт.

Т а б л и ц а 2. Основные характеристики источников импульсного питания установки КТМ

Основной комплектующей единицей системы импульсного электропитания токамака КТМ является тиристорный преобразователь ТП, построенный по мостовой 6-пульсной схеме выпрямления (схема Ларионова). Технические решения, принятые при разработке ТП, обеспечивают высокую ремонтопригодность источников питания. Это достигается путём применения модульной конструкции как на уровне силовых цепей, так и на уровне электронных устройств управления тиристорными ключами и измерения электрических параметров преобразователя (диагностики).

ТП представляет собой электротехнический шкаф с 12 ячейками силовых ключей (преобразовательных секций), по три параллельно включённых тиристора SCR 1200 А/1800 В в каждой, которые, в свою очередь, соединены в два трёхфазных полностью управляемых мостовых выпрямителя. Мостовые выпрямители в рабочих конфигурациях ТП источников питания обмоток TF и CS соединяются параллельно, в источниках питания PF1—PF6 — встречно-параллельно в целях обеспечения режимов реверсирования тока с раздельным управлением. Шкафы TП охлаждаются циркулирующей деионизированной водой.

На рис. 3 изображена 3D-модель шкафа TП с установленными в нём 12 преобразовательными секциями. С помощью 3D-моделирования была определена оптимальная структура расположения элементов преобразователя в пространстве, выполнена трассировка токоведущих силовых шин, контрольно-измерительных кабелей и элементов системы охлаждения. Полученные данные были использованы в расчётах механической прочности элементов преобразователя, а также для реализации рабочих чертежей силовой структуры шкафа. Фотография зала источников импульсного электропитания токамака КТМ с установленным преобразовательным оборудованием TП, уравнительными реакторами и шинопроводами показана на рис. 4.



Рис. 3. 3D-модель шкафа ТП-системы импульсного электропитания токамака КТМ



Рис. 4. Фото зала источников импульсного питания токамака КТМ с установленными ТП

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПОНОВКИ И РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ В СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Реализация параллельного соединения полупроводниковых ключей в сверхмощных AC/DCпреобразователях является нетривиальной задачей. От этого фактора зависят эффективность использования ключей преобразователя, его нагрузочные характеристики, а также надёжность преобразователя в целом. При этом используются различные схемотехнические, а также геометрические способы соединения комплектующих преобразователей, позволяющие свести небаланс токов в параллельных ветвях к минимуму [4—7].

При разработке ТП-системы импульсного электропитания токамака КТМ применено довольно оригинальное решение проблемы деления токов по параллельно соединённым тиристорам. Последовательно к каждому тиристору подключён кремниевый резистор сопротивлением R = 0,001 Ом с жидкостным охлаждением, позволяющий, кроме решения проблемы деления токов, осуществлять диагностику в режиме реального времени каждого отдельного тиристора преобразовательного комплекса [8]. Компоновка реверсивного шкафа ТП и принципиальная схема его преобразовательной секции изображены на рис. 5.



Рис. 5. Компоновка шкафа ТП (*a*) и принципиальная схема его единичной преобразовательной секции (*б*): —, — силовые шины; - - — кабель POF-оптоволокно; — провод питающей сети постоянного тока 24 В (+); — провод питающей сети постоянного тока 24 В (+); — провод питающей сети постоянного тока 24 В (0); — провод питающей сети постоянного тока 24 В (L); — провод питающей сети постоянного тока 24 В (N)

Из схемы компоновки видно, что один и тот же ТП в зависимости от назначения конкретного источника питания и его схемы может быть скомпонован как в реверсивном варианте, так и не в реверсивном. При нереверсивной компоновке максимальный выходной ток единичного ТП соответственно удваивается и становится равным 15 кА. Преобразовательные секции (панели ТП) при этом делятся на условно положительные (показаны красным цветом) и условно отрицательные (показаны синим цветом). Различие заключается в положении катодов тиристоров относительно шин постоянного и переменного тока. При этом единичная панель ТП содержит следующие элементы: FU1—FU3 — быстродействующие предохранители, R1—R3 — кремниевые шунты таблеточного исполнения, VS1—VS3 — тиристоры SCR 1200 A/1800 B, FV1—FV3 — снабберные цепи; блок КИПиА, состоящий из устройств ДСК-6А-МПТ (драйвер тиристоров SCR) и ПИТ-3К (трёхканальный блок измерения тока, протекающего через тиристоры преобразовательной секции ТП).

На рис. 6, *а* изображена 3D-модель единичной преобразовательной секции TП, на рис. 6, *б* — фото-графия данной преобразовательной секции, установленной в шкафу TП.

Проведённые электротехнические испытания показали довольно высокую эффективность решения проблемы деления токов по параллельно соединённым тиристорам в преобразовательном комплексе КТМ. На рис. 7 видно, что форма, амплитудные и средние значения импульсов тока в тиристорах одной из преобразовательных секций ТП практически идентичны. В целом по всем 30 шкафам ТП удалось добиться среднего коэффициента небаланса токов 5,85% при считающихся приемлемыми 20% в тиристорных преобразователях систем электропитания [5, 6, 9].





б

Рис. 6. Единичная преобразовательная секция ТП: *а* — 3D-модель; *б* — фото



Рис. 7. Осциллограммы токов через три параллельно соединённых тиристора одной из преобразовательных секций ТП системы импульсного электропитания токамака КТМ

ПРЕРЫВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА 30 кА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ОБМОТКИ ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА КТМ

Для сценария изменения тока в обмотке центрального соленоида токамака КТМ характерна фаза резкого уменьшения значения тока, следующая за фазой предварительной «накачки», необходимая для создания максимального уровня напряжения на обходе вакуумной камеры (максимальной напряжённости вихревого электромагнитного поля) в целях пробоя рабочего газа и быстрого роста значения тока плазмы. На рис. 8 видно, что ток в обмотке центрального соленоида токамака КТМ должен уменьшиться с 30 кА до 0 за время ~0,23 с, что соответствует скорости уменьшения тока в обмотке ~130,4 кА/с.

Требуемая величина скорости уменьшения тока в обмотке центрального соленоида может быть достигнута приложением соответствующего уровня напряжения, которое во много раз превышает требуемое напряжение для остальных фаз разряда.



Рис. 8. Инженерный сценарий изменения тока в обмотке центрального соленоида токамака КТМ в процессе плазменного разряда

С целью достижения требуемой скорости уменьшения тока в обмотке центрального соленоида токамака КТМ применено решение, основанное на введении в контур электропитания обмотки дополнительного резистивного элемента (балластного сопротивления) в момент инициации плазменного разряда. Поскольку время уменьшения тока в обмотке центрального соленоида t описывается соотношением $t = -T\ln(1 - R/U)$, где I — начальный ток в обмотке; R — активное сопротивление контура питания; U — напряжение на обмотке; T — постоянная времени контура, определяемая отношением T = L/R, где L —индуктивность, R — активное сопротивление контура, то при введении в контур питания дополнительного сопротивления постоянная времени уменьшается, что ведёт к существенному сокращению времени спада тока. При этом на выводах обмотки центрального соленоида создаётся требуемое по уровню напряжение, превышающее уровень напряжения источника питания.

Введение в контур электропитания обмотки КТМ дополнительного сопротивления достигается с использованием полупроводникового ключа-прерывателя на полный ток нагрузки 30 кА, отличающегося от известных ключей-прерывателей [10—14] схемотехническим решением, основанным на использовании однооперационных тиристоров SCR и силовых диодов без применения электромеханических бай-

пасных схем. На рис. 9 изображена принципиальная схема ключа-прерывателя постоянного тока источника питания обмотки центрального соленоида токамака КТМ.

В начале токового сценария в обмотке CS «накачка» обмотки до рабочего тока 30 кА происходит через группу 30 параллельно соединённых тиристорных секций VTO, в которых используются по три последовательно соединённых тиристора SCR 1200 А/1800 В, для выхода на требуемый уровень рабочего напряжения и тока. В момент старта плазменного разряда предварительно заряженный от автономного зарядного устройства VT1 конденсаторный блок C_k при помощи секции тиристоров VTK1 создаёт импульс тока в противоток комплекту VTO. При этом полный ток нагрузки складывается из тока источника питания обмотки CS и тока контура C_k — L_k . В этот момент ток через VTO прерывается, и по завершении разряда конденсаторного блока Ck ток контура питания обмотки CS перекоммутируется на балластное сопротивление R. В дальнейшем, в ходе плаз-



Рис. 9. Принципиальная схема ключа-прерывателя постоянного тока

менного разряда, при переходе тока в обмотке центрального соленоида через ноль реверсивный комплект источника питания начинает питать нагрузку уже через 20 параллельно соединённых диодных секций VDO, состоящих из трёх последовательно соединённых диодов 1500 A/1600 B, перезарядка конденсаторного блока C_k для подготовки реализации следующего плазменного разряда КТМ осуществляется через секцию тиристоров VTK2.

Для проверки разработанного схемотехнического решения было произведено натурное макетирование ключа-прерывателя тока с использованием в качестве источника питания центрального соленоида конденсаторной батареи. Натурное макетирование позволило безопасно для штатных тиристорных преобразователей источника питания центрального соленоида КТМ отработать режимы переключения и убедиться в работоспособности схемы.

Для натурного макета была предложена схема ключа-прерывателя, в которой отличие от штатной схемы заключается в изменении типа источника питания и количества параллельно соединённых сило-



Рис. 10. Принципиальная схема макета ключа-прерывателя постоянного тока

вых полупроводниковых элементов. На рис. 10 показана предложенная схема натурного макета ключа-прерывателя тока на основе конденсаторного источника питания. Здесь тиристоры T1 и T2 относятся к конденсаторному источнику питания, а тиристоры T3 и T4 соответствуют сборке тиристоров VTO. Диоды D1—D4 подключены аналогично диодной сборке VDO, тиристоры Tk1 и Tk2 подключены аналогично сборке тиристоров VTK1 штатной схемы. В схему натурного макета введены дополнительно датчики Холла (HS1—HS5) для измерения токов во всех исследуемых токовых цепях.

Для выбора начального значения балластного сопротивления R_{bal} были учтены проектное ограничение напряжения на обмотке центрального соленоида $U \leq 3300$ В и необходимость получения наибольшего напряжения в начальный момент стадии пробоя, после переключения тока нагрузки на R_{bal} . Для этой цели была численно решена система уравнений следующего вида, описывающая динамику тока в обмотке центрального соленоида и наведённого вихревого тока на вакуумной камере токамака:

$$L_{\rm CS} \frac{dI_{\rm CS}}{dt} + R_{\rm CS}I_{\rm CS} + M_{\rm CSVC} \frac{dI_{\rm VC}}{dt} = U_{\rm CB} - \frac{1}{C}\int_0^t I_{\rm CS}dt;$$
$$L_{\rm VC} \frac{dI_{\rm VC}}{dt} + R_{\rm VC}I_{\rm VC} + M_{\rm VCCS} \frac{dI_{\rm CS}}{dt} = 0,$$

где L_{CS} , I_{CS} , R_{CS} — индуктивность, ток и активное сопротивление контура питания обмотки центрального соленоида; L_{VC} , I_{VC} , R_{VC} — индуктивность, ток и активное сопротивление вакуумной камеры токамака; U_{CB} — напряжение конденсаторного источника питания; M_{CSVC} и M_{VCCS} — взаимные индуктивности вакуумной камеры и обмотки центрального соленоида КТМ.

Численное решение указанной системы уравнений позволило рассчитать динамику тока в обмотке центрального соленоида до переключения тока с активным сопротивлением контура, равным R_{CS} (с нулевыми начальными условиями), а также после переключения тока с активным сопротивлением контура, равным сумме R_{bal} и R_{CS} (с ненулевыми начальными условиями). Результаты сопоставления расчёт-

ных и экспериментальных данных показаны на рис. 11. На рисунке использованы следующие условные обозначения: I_{CS} — ток в обмотке CS; I_{bal} — ток в балластном сопротивлении; I_k — ток сборки C_k — L_k ; $L_{CS}dI_{CS}/dt$ — индуктивное напряжение на обмотке CS. На рис. 11 видно, что расчётные и экспериментальные данные практически совпадают.



Рис. 11. Ток и напряжение в схеме макета ключа-прерывателя: a — измеренные, δ — расчётные; — L_{CS} ; — L_{bal} ; — $-L_{cS}dL_{CS}/dt$

Основные компоненты макета ключа-прерывателя постоянного тока источника питания центрального соленоида токамака КТМ показаны на рис. 12. На фотографиях показаны конденсаторная батарея $C_{\rm CS}$ (слева), балластное сопротивление $R_{\rm bal}$ (в центре) (*a*), сборки силовых элементов в монтажном шкафу (*б*), сборка мощных тиристоров прямой ветви тока T1—T4 (*в*), сборка мощных диодов прерывателя тока D1—D4 (*г*), сборка мощных тиристоров прерывателя тока Tk1 и Tk2 (*д*).



Рис. 12. Фотографии фрагментов схемы натурного макета ключа-прерывателя тока

В ходе проведения экспериментов с макетом ключа-прерывателя тока были оптимизированы номиналы ключевых элементов штатной схемы ключа, определено их влияние на надёжность и скорость прерывания тока и его переключения на балластное сопротивление. Определён максимальный ток коммутирующей ветви C_k — L_k , необходимый для устойчивого переключения рабочего тока обмотки центрального соленоида на балластное сопротивление. Прерываемый рабочий ток обмотки центрального соленоида в экспериментах был равен $I_{CS} = 5000$ А, величина балластного сопротивления $R_{bal} = 0,3$ Ом при параметрах $C_k = 0,0033$ Ф, $L_k = 0,00015$ Гн. Таким образом, удалось добиться устойчивого прерывания и переключения тока на балластное сопротивление за время порядка 3 мс. Результаты экспериментов с макетом ключа-прерывателя постоянного тока источника питания центрального соленоида токамака КТМ отображены на рис. 13.



Рис. 13. Диаграмма токов в источнике питания обмотки CS при плазменном разряде: *а* — полный вид; *б* — увеличенный фрагмент момента переключения тока на балластное сопротивление; — HS5, ток в индукторе CS; — HS4, суммарный ток тиристоров T3, T4; — HS1, ток разряда *C*_k на тиристоры T3, T4; — HS2, ток диодов D1, D2; — HS3, ток в *R*_{bal}

На рис. 13, *а* изображён разряд, в котором получено устойчивое переключение тока обмотки центрального сопротивления на балластное сопротивление $R_{bal} = 0,3$ Ом при параметрах $C_k = 0,0033$ Ф, $L_k = 0,00015$ Гн, на рис. 13, *б* изображён увеличенный фрагмент момента переключения тока на балластное сопротивление в этом же разряде. На рис. 13, *а* видно, что после переключения полного тока обмотки центрального соленоида $I_{CS} = 5000$ А на балластное сопротивление наклон и форма кривой изменения тока в контуре питания обмотки CS становятся намного круче (не повторяют форму четверти периода синусоиды), что свидетельствует о существенном приросте скорости спада тока в момент пробоя.

выводы

В настоящее время полный цикл испытания оборудования системы импульсного электропитания токамака КТМ, как и системы её цифрового управления, практически завершён, предварительные испытания показали достаточную эффективность принятых электротехнических решений для основного оборудования и комплектующих, а также возможность их использования при реализации систем импульсного электропитания токамаков малой и средней мощности. Установленная мощность электрооборудования соответствует требуемому уровню для надёжного электропитания обмоток электромагнитной системы токамака КТМ, а система цифрового управления преобразовательным оборудованием позволяет реализовывать необходимые алгоритмы управления и диагностики в режиме реального времени. Надёжность конструктивных решений, эффективность информационного и алгоритмического обеспечения системы импульсного электропитания позволили успешно провести начальные этапы физического пуска токамака КТМ, что даёт возможность прогнозировать эффективность и работоспособность системы на следующих этапах физического пуска установки, а также на этапах эксплуатации токамака КТМ на проектных параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарбаев Н.А., Школьник В.С., Батырбеков Э.Г., Березин С.А., Лукашенко С.Н., Скаков М.К. Проведение комплекса научно-технических и инженерных работ по приведению бывшего Семипалатинского испытательного полигона в безопасное состояние. — Курчатов: РГП «Национальный ядерный центр РК», 2016, с. 35—60.

- 2. Азизов Э.А., Тажибаева И.Л., Велихов Е.П., Школьник В.С. и др. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. Алматы, 2006. 236 с.
- 3. Tazhibayeva I.L., Azizov E.A., Krylov V.A., Shkolnik V.S., Velikhov E.P. et al. KTM Experimental Complex project Status. Fusion Science and Technology, 2005, vol. 47, p. 746—750.
- 4. Fuentes R., Neira L. Effects of layout on current distribution in paralleled thyristors of high current rectifiers. IEEE Paper No. PCIC- 2007-21, p. 1—6.
- Oh J.-S., Choi J., Suh J.-H., Choi J., Lee L, Kim C., Park H., Jo S., Lee S., Hwang K., Liu H., Hong Ki.-D., Sim D.-J., Lee J.-S., Lee E.-J., Kwon Y.-H., Lee D.-Y., Ko K.-W., Kim J.-M., Song I., Reynaud P., Tan H., Tao J., Goff J. Final design of the Korean AC/DC converters for the ITER coil power supply system. — Fusion Engineering and Design, 2015, p. 2—3.
- 6. Oh J.-S., Choi J., Suh J.-H., Liu H., Lee S., Park H., Jung W., Jo S., Tan H., Tao J., Fu P. Korean r&d on the 6-pulse converter unit for ITER acidc converters. In: 24th Symposium on Fusion Engineering, 2011, p. 1—6.
- 7. Chen Peng, Fu Peng, Song Zhiquan. An improvement on current sharing characteristics of poloidal field (PF) AC—DC Converters. Plasma Science and Technology, 2011, vol. 13, № 4, p. 1—6.
- Качкин А.Г. Павлов В.М. Информационное и алгоритмическое обеспечение блока диагностики системы управления источниками питания обмоток полоидального поля токамака КТМ. Известия Томского политехнического университета, 2009, т. 314, № 5, с. 58.
- 9. Bertolini E., Mondino P.L., Noll P. The JET magnet power supplies and plasma control systems. Fusion Technology, 2017, vol. 11, p. 84.
- 10. Lampasi A., Coletti A., Novello L., Matsukawa M., Burini F., Taddia G., Tenconi S. Final design of the switching network units for the JT-60SA central solenoid. Fusion Engineering and Design 2014, vol. 89, p. 1—7.
- 11. Gaio E., Maistrello A., Coffetti A., Gargano T., Perna M., Novello L., Coletti A., Matsukawa M., Yamauchi K. Final design of the quench protection circuits for the JT-60SA superconducting magnets. Transactions on Plasma Science, 2012, vol. 40, № 3, p. 557—563.
- 12. Fu P., Liu Z.Z., Gao G., Yang L., Song Z.Q., Xu L.W., Tao J., Liu X.N. Power supply system of EAST superconducting tokamak. — In: 5th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, 2010, p. 459.
- 13. Tao J., Benfatto I., Goff J.-K., Mankani A., Milani F., Song I., Tan H., Thomsen J. ITER coil power supply and distribution system. In: IEEEINPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, 2011, p. 5—6.
- Roshal A., Avanesov S., Koktsinskaya E., Manzuk M., Milani F., Mustafa G., Nesterenko A., Song I., Filippov A., Frolov A. Design and analysis of switching network units for the ITER coil power supply system. — Fusion Engineering and Design, 2011, vol. 86, p. 1450—1453.



Денис Борисович Зарва, начальник управления инвестиционных проектов; Национальный ядерный центр Республики Казахстан, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 2, здание 054 Б, Казахстан

e-mail: zarva@nnc.kz



Юрий Николаевич Голобоков, инженер Центра информационных технологий; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия e-mail: golobokov@tpu.ru



Эрлан Гадлетович Батырбеков, Генеральный директор, д.ф.-м.н., профессор; Национальный ядерный центр Республики Казахстан, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 2, здание 054 Б, Казахстан; профессор; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия e-mail: batyrbekov@nnc.kz



Ирина Лашкаровна Тажибаева, заместитель директора филиала ИАЭ НЯЦ РК, исполнительный директор Центра безопасности ядерных технологий, д.ф.-м.н.; 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 10, Казахстан; профессор; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия e-mail: tazhibayeva@ntsc.kz

Д.Б. Зарва, А.А. Дериглазов, Э.Г. Батырбеков, И.Л. Тажибаева, В.М. Павлов, А.М. Ли, А.А. Мезенцев и др.



Вадим Михайлович Павлов, к. техн. н., доцент; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия e-mail: pavlov@tpu.ru



Алексей Михайлович Ли, программист; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия

e-mail: alee@tpu.ru



Антон Алексеевич Мезенцев, к. техн. н., доцент; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия mezentsev.anton@gmail.com



Степан Вадимович Меркулов, инженер-проектировщик; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия e-mail: stepan@tpu.ru



Алексей Алексеевич Дериглазов, инженерпроектировщик; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина 30, Россия e-mail: aad3@tpu.ru

> Статья поступила в редакцию 15 марта 2018 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 59—70.