

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КАТУШЕК ТОКАМАКА МИФИСТ-0

© 2025 г. Н. Е. Ефимов^{a,*}, Ф. С. Подоляко^a, И. И. Пашков^a, А. С. Пришибиць^a,
И. А. Сорокин^{a,b}, В. В. Вайтонис^a, С. А. Крат^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^bФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская обл., 141120 Россия

*E-mail: neefimov@merphi.ru

Поступила в редакцию 07.11.2024 г.

После доработки 19.11.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

Работа посвящена разработке и испытанию импульсной системы питания магнитных катушек учебно-исследовательского токамака МИФИСТ-0, включающей конденсаторные накопители, устройства их автоматизированной зарядки, мониторинга состояния, синхронизированной коммутации на катушки тороидального, полоидального поля и на центральный соленоид, а также системы защиты. Подробно рассмотрены технические аспекты разработанной системы с позиций простоты, масштабируемости, отказоустойчивости, ремонтопригодности, а также возможности самостоятельной модификации. Реализованные решения, включающие принципиальные электрические схемы, разработанные платы и блоки, могут быть полезными на электрофизических установках со схожими параметрами и задачами.

Ключевые слова: токамаки, импульсные системы питания, генераторы задержек, автоматизация

DOI: 10.56304/S2079562925060065

ВВЕДЕНИЕ

МИФИСТ-0 – малый учебно-исследовательский сферический токамак, функционирующий на базе университета НИЯУ МИФИ. Основные задачи данного проекта включают подготовку научно-технических кадров для формирующейся отрасли термоядерной энергетики, отработку решений для более крупных установок (диагностики, системы управления и сбор данных), материально-вещественные исследования различных концепций обращенных к плазме элементов, а также исследование возможностей предионизации и нагрева плазмы [1]. Большой радиус установки составляет 25 см, малый радиус – 13 см. На текущий момент среднее время импульса плазмы при разряде на протии достигает 3 мс при токе плазмы около 6 кА и тороидальном магнитном поле до 0.3 Тл.

Любой токамак – это прежде всего электрофизическая установка, предназначенная для формирования конфигурации магнитного поля, препятствующей разрушительному воздействию высокотемпературной плазмы на обращенные к ней элементы установки. Для создания тороидального магнитного поля в МИФИСТе используется одновитковый винтовой тороидальный соленоид с общей индуктивностью 24 мкГн, позволяющий

создавать максимальное магнитное поле в области горения разряда до 0.8 Тл [2]. Схожая по конструкции система генерации тороидального магнитного поля задействована в токамаках GUTTA [3] и GLAST [4]. Особенности данного подхода на примере токамака МИФИСТ подробно изложены в работах [2, 5, 6].

Для создания вихревого электрического поля в токамаке создан двухслойный центральный соленоид с воздушным сердечником и индуктивностью 375 мкГн. Компенсация рассеянных магнитных полей и управление положением плазменного шнуря осуществляется с помощью набора из 3 пар многовитковых многовыводных полоидальных катушек с индуктивностями в диапазоне 180–700 мкГн [6, 7]. Все катушки электромагнитной системы (ЭМС) токамака изготовлены из меди и рассчитаны на работу на коротких импульсах ввиду отсутствия активного охлаждения.

Создание систем импульсного питания токамаков является комплексной научно-технической задачей, так как из-за малочисленности установок данного типа стандартные серийные решения зачастую отсутствуют. Это приводит к необходимости штучного изготовления таких узлов под конкретные технические задачи. На крупных россий-

ских токамаках, таких как Глобус-М2 и Т15-МД, уровень допуска студентов к управлению, настройке, и модернизации систем установки, как правило, ограничен в силу крайне высокой стоимости ошибки, выражающейся как в материальном ущербе, так и в угрозе здоровью и жизни персонала.

В то же время, МИФИСТ-0 – учебная установка, созданная с учетом возможности эксплуатации с участием заведомо низкоквалифицированного персонала – студентов младших курсов и даже школьников. Это накладывает на все ее узлы и, в частности, систему питания с одной стороны требование высокой степени автономности при работе, а с другой – требования отказоустойчивости и ремонтопригодности комплектующих, причем с учетом возможности оперативной замены вышедших из строя компонентов за счет местного рынка. Вкупе со скромным относительно крупных машин бюджетом это приводит к необходимости разработки узлов системы питания на базе доступных и принципиально заменяемых компонентов, с учетом мер по обеспечению безопасной эксплуатации установки.

Данная работа посвящена описанию ключевых аспектов системы управления питанием ЭМС токамака МИФИСТ, характеризующейся высокой степенью самостоятельно изготовленных компонентов. Рассмотрены основные технические решения, методы повышения масштабируемости, отказоустойчивости, ремонтопригодности и общей надежности системы, а также результаты экспериментальных испытаний. Реализованные подходы, воплощенные в конкретных схемах, платах и блоках питания, могут быть полезны для электрофизических установок со схожими параметрами и направленностью.

1. ОБЩАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭМС ТОКАМАКА МИФИСТ

В крупных токамаках в качестве источника питания ЭМС обычно применяется либо внешняя промышленная сеть электропитания, как, например, на EAST [8], T-15МД [9], KTM [10] и строящемся ITER [11], либо инерционные и индуктивные накопители, как, в частности, на токамаках JET, ASDEX, JT-60SA [12]. В свою очередь, для малых установок с ограниченным инфраструктурным фондом и относительно скромными параметрами плазмы все еще характерно использование емкостных накопителей энергии, заряжаемых от бытовой электросети. Типичными представителями установок этого класса являются стелларатор L-2M [13] и токамаки SMART [14], GOLEM [15], GLAST [16], Taban [17] и MT-I [18]. Аналогично, для питания ЭМС МИФИСТа также были выбраны конденсаторные накопители, как технически наиболее простое в эксплуатации решение, позволяющее к тому же гибко перераспределять

имеющуюся суммарную емкость между независимыми батареями катушек.

ЭМС токамака МИФИСТ состоит из восьми независимых конденсаторных батарей (см. рис. 1): батарея С1 на базе электролитических конденсаторов “Nichicon CE” ($U_{\text{ном}} = 450$ В, $C = 15$ мФ) для тороидальной катушки L3 (TF), батарея С2 из пленочных конденсаторов “Элкод К75-100” ($U_{\text{ном}} = 3$ кВ, $C = 5.6$ мФ) для центрального соленоида L4 (CS), а также по 3 ступени батарей С3, собранных из конденсаторов “Элкод К75-100”, “Nichicon CE” и электролитических конденсаторов “AnXon C36” ($U_{\text{ном}} = 250$ В, $C = 15$ мФ) для двух групп сдвоенных полоидальных катушек L5–L6 (PF).

Коммутация батарей тороидальной катушки и центрального соленоида производится с помощью отечественных силовых тиристоров “T293-5000” с ударным током до 100 кА, в то время как группа батарей полоидальных катушек – с помощью младшей модели тиристоров “T143-500-16” с ударным током до 11 кА. Для защиты батарей от переполюсовки, способной возникнуть за счет запасенной в нагрузке во время импульса реактивной энергии, что особенно критично для электролитических конденсаторов, в цепи предусмотрены системы компенсации реактивной мощности (СКРМ), включающие обратные диоды и снабберные цепи.

Система питания токамака МИФИСТ также предусматривает систему аварийного сброса энергии (САСЭ) с заряженных конденсаторов через самостоятельно изготовленные сильноточные механические коммутаторы SW1–SW3 на высокомощные балластные резисторы R1–R3. Зарядка батарей производится через набор блоков распределения питания (БРП), реализующих распределение питания с единого зарядного блока питания (ЗБП).

Цифровизация управления системой питания реализована через следующий набор блоков:

- типовые мелкосерийные ЗБП на 5 кВ и 500 В со связью по интерфейсу RS-485 по протоколу Modbus;
- два самостоятельно изготовленных БРП со связью через Ethernet и протоколом Modbus;
- самостоятельно изготовленный блок синхронизации ГЗИ с управлением по USB;
- модуль дискретного вывода отечественного производителя ОВЕН “МК210-401” для управления коммутаторами SW1–SW3 по Ethernet и Modbus;
- набор АЦП “ADS1115” для мониторинга заряда батарей с передачей данных по WI – FI за счет микроконтроллеров “ESP8266”.

Непосредственное удаленное пользовательское взаимодействие с системой управления питанием осуществлено через распределенную систему автоматизации токамака, реализованную на базе EPICS

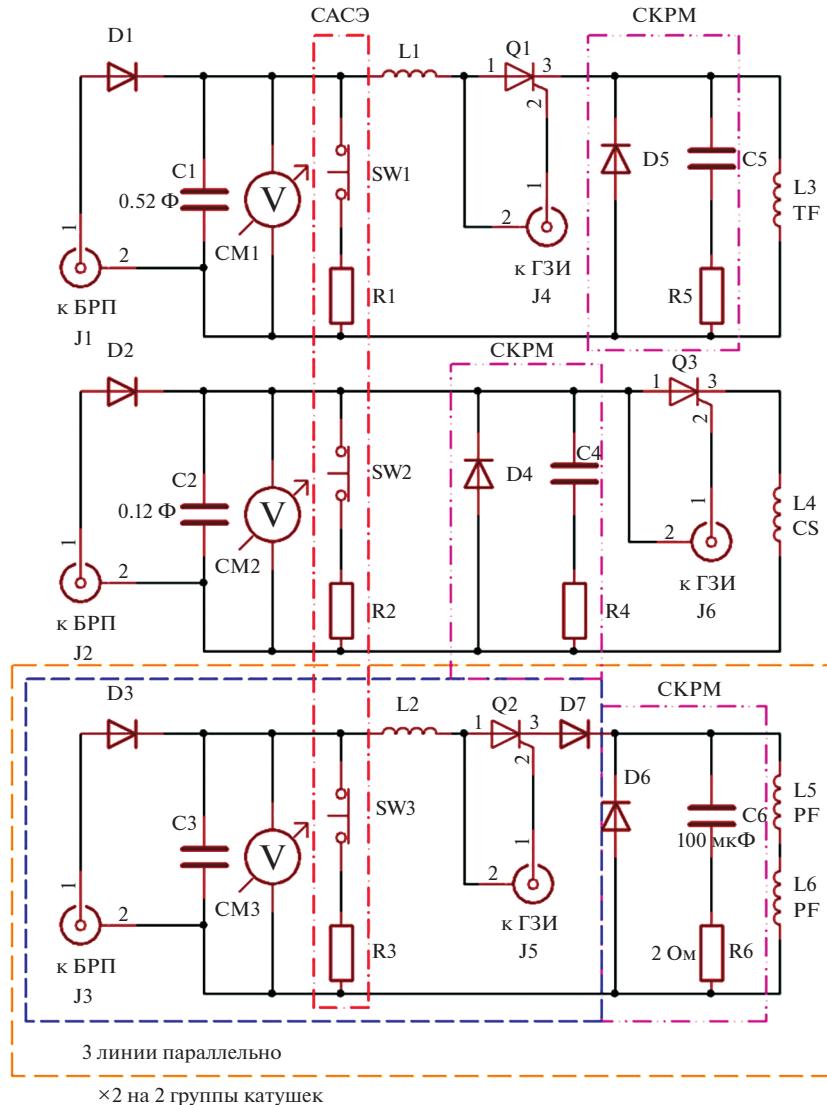


Рис. 1. Общая электрическая схема питания ЭМС токамака МИФИСТ. TF – катушка тороидального поля, CS – центральный соленоид, PF – полоидальные катушки, ГЗИ – генератор задержанных импульсов, БРП – блок распределения питания, СМ – система мониторинга, САСЭ – система аварийного сброса энергии, СКРМ – система компенсации реактивной мощности.

и описанную в [19]. Подключение вышеперечисленных блоков к общей сети осуществлено через программные контроллеры ввода-вывода, развернутые на одноплатном компьютере “Raspberry Pi 3”. Поскольку взаимодействие с большинством блоков реализовано через Ethernet, непосредственно к Raspberry подключены только ЗБП и ГЗИ, а остальные узлы подключены к нему через сетевые коммутаторы.

При разработке блоков управления питанием было решено придерживаться стандартных типо-размеров корпусов для размещения в одной девятнадцатидюймовой телекоммуникационной стойке. При этом в случае необходимости увеличения числа каналов зарядки или синхронизации, целесооб-

разным показалось вместо наращивания размеров корпуса (либо уплотнения расположения компонентов) заложить возможность их дублирования. Фотография основных конденсаторных батарей представлена на рис. 2а, стойки со всеми основными компонентами питания и управления – на рис. 2б, основные узлы коммутации – на рис. 2в и 2г.

2. СИСТЕМА ЗАРЯДКИ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Наличие множества конденсаторных батарей с различными уровнями рабочих напряжений в ЭМС токамака МИФИСТ, а также потенциальный рост их числа, в частности, для реализации

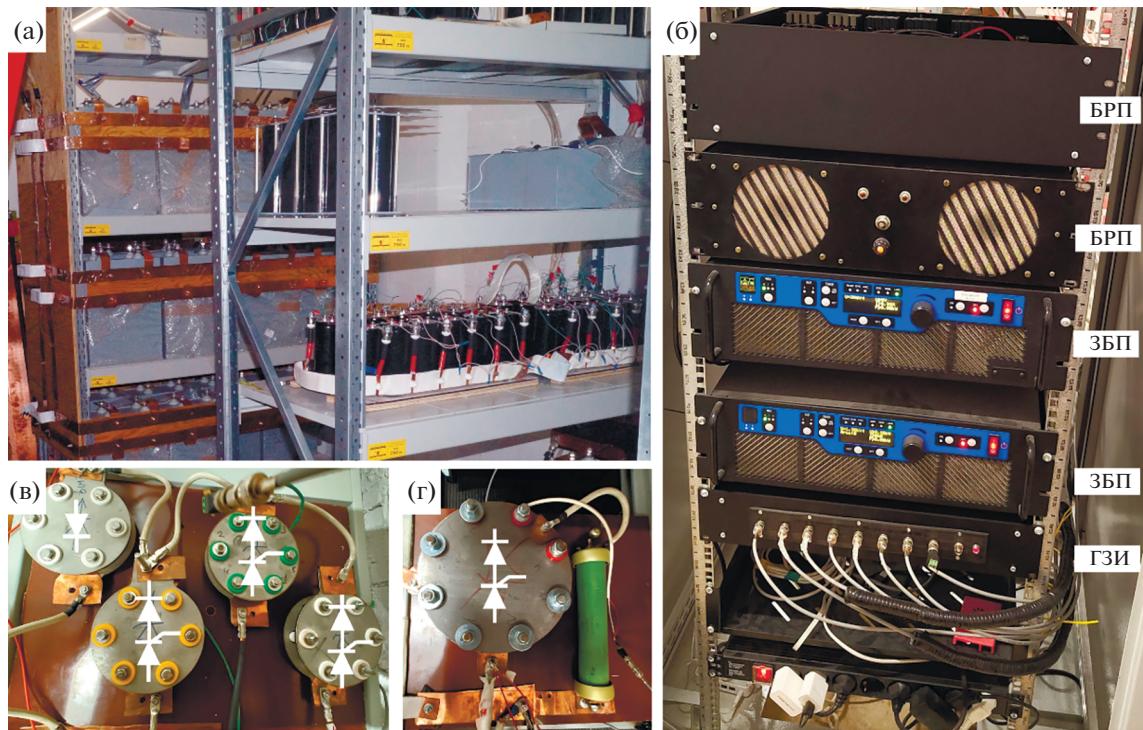


Рис. 2. Фотографии конденсаторных батарей (а), стойки с блоками зарядки батарей и синхронизации запуска тиристоров (б), сборки коммутации полоидальных катушек (в) и центрального соленоида (г) токамака МИФИСТ.

диверторной конфигурации удержания плазмы, сформировали необходимость параллелизации зарядки батарей с контролем уровня напряжения на них для своевременного отключения от цепи зарядки. Ввиду высокой стоимости высоковольтных мощных источников постоянного напряжения была разработана схема распределения питания, позволяющая осуществлять одновременную зарядку нескольких батарей до различных произвольных напряжений в пределах номинальных значений от одного внешнего зарядного блока питания (ЗБП), в роли которого выступали мелкосерийные регулируемые источники постоянного напряжения производства ООО “Прикладная электроника” серии “APEL-HV-DC”.

Основные требования на блоки распределения питания (БРП) включали возможность масштабирования числа каналов зарядки от общего ЗБП, возможность эксплуатации с ЗБП постоянного тока с напряжениями от ста вольт до 3 кВ, что следовало из предельного рабочего напряжения имеющихся конденсаторов, и с токами зарядки до 16 А. Для минимизации взаимовлияния цепей БРП и силовых цепей во время рабочего импульса критичной оказалась необходимость обеспечения механического разрыва цепей каждого канала после осуществления зарядки батареи, а также цепи ЗБП.

2.1. Принцип работы узла коммутации силовых цепей БРП

С учетом общих требований отказоустойчивости, ремонтопригодности, возможности быстрой замены/ремонта компонентов и самостоятельной модернизации к блокам системы питания ЭМС токамака МИФИСТ в качестве основных средств коммутации в зарядной цепи были предложены бытовые контакторы магнитные (КМ), управляемые через твердотельные реле “HHG1-1/032F-38-20A”. Такие КМ, как правило, имеют номинальные рабочие напряжения переменного тока до 660 В и, вообще говоря, не рассчитаны на коммутацию высоковольтных цепей. В то же время, напряжение изоляции между контактами КМ в разомкнутом состоянии превосходит необходимые 3 кВ. В связи с этим был реализован алгоритм зарядки, при котором разность потенциалов в моменты замыкания/размыкания не превышает номинальные для использованных КМ.

Силовая часть структурной схемы БРП включает в себя пусковое распределительное устройство (ПРУ) и зарядные устройства (ЗУ). В основе каждого структурного элемента силовой схемы коммутации лежат электромагнитные пускатели КМ с управляющим сетевым напряжением 220 В 50 Гц. Это обстоятельство позволяет реализовывать различные вариации подключения пускателей с “самоподхватом”, то есть включением цепи управле-

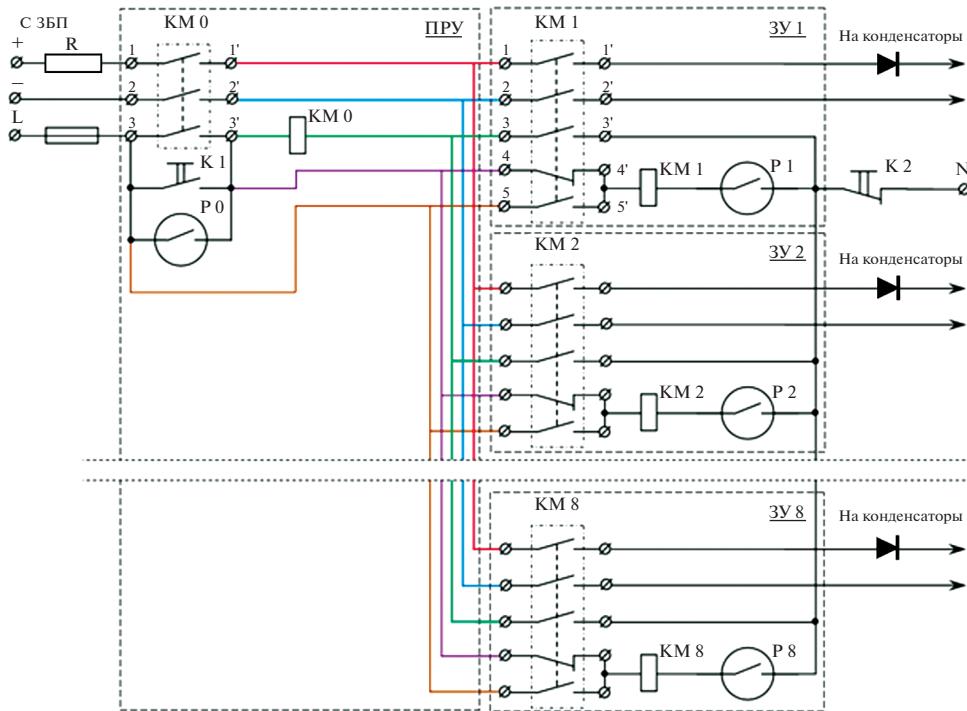


Рис. 3. Электрическая схема коммутации БРП. КМ – контактор магнитный, Р – твердотельное реле, К – ключи, Л – фаза и Н – нейтраль сетевого напряжения, ПРУ – пусковое распределительное устройство, ЗУ – зарядное устройство.

ния пускателя в его силовые контактные группы, что позволяет создавать аналоговые взаимосвязи работы основного силового пускателя в составе ПРУ и пускателей в составе каждого отдельного ЗУ.

Упрощенная электрическая схема силовой части БРП представлена на рис. 3. Принцип работы блока следующий. В начальный момент все КМ разомкнуты, при этом в отсутствии разности потенциалов между контактами 1 и 2 контроллер подает уровень логической единицы на реле Р1–Р8, приводя к их замыканию. Напряжение на выходном каскаде ЗБП отсутствует. При подаче пользователем сигнала на зарядку, что осуществляется либо ручным замыканием ключа К1, либо командой с удаленного контроллера на замыкание Р0, происходит коммутация фазы на контактную группу 4–4' для КМ1–КМ8, что вызывает их замыкание и впоследствии реализацию самоподхвата через замыкание групп 5–5' и размыкание групп 4–4'. При этом одновременно с КМ1–КМ8 замыкается и КМ0 за счет подхвата через группы 3–3'. Соответственно, далее при разомкнутых К1 и Р0 контакторы КМ0–КМ8 продолжают быть замкнутыми, причем КМ0 остается замкнутым до тех пор, пока замкнут хотя бы один из КМ1–КМ8.

После срабатывания БРП отправляется команда на ЗБП на подачу напряжения, что инициирует начало зарядки батарей. ЗБП функционирует в режиме ограничения по напряжению, а для ограничения максимального выходного тока преду-

смотрен высокомощный резистор. Параллельно с зарядкой контроллер осуществляет сравнение разности потенциалов между контактами 1–2 с предустановленным пользователем значением напряжения на батарее, до которого необходимо осуществить зарядку на каждом конкретном канале. По достижению необходимого напряжения контроллер отключает соответствующее реле Р, вызывая размыкание КМ данного канала. По окончании зарядки последнего канала и размыкании его КМ происходит размыкание КМ0 и, соответственно, отключение ЗБП от БРП. После этого отправляется команда на ЗБП на прекращение подачи напряжения.

Если установленное на ЗБП напряжение не превышает максимальную уставку напряжения зарядки батареи более, чем на номинальное рабочее напряжение использованного электромагнитного пускателя, то при размыкании КМ разность потенциалов между контактами будет в пределах номинала. Таким образом, при использовании контакторов в данной схеме предельное рабочее напряжение БРП определяется не номинальным коммутируемым напряжением, а напряжением изоляции между соседними контактами электромагнитного реле, составляющим для доступных стандартных моделей около 6 кВ. Таким образом, представленная схема осуществляет параллельно-последовательную зарядку батарей конденсаторов в порядке возрастания уставок напряжения

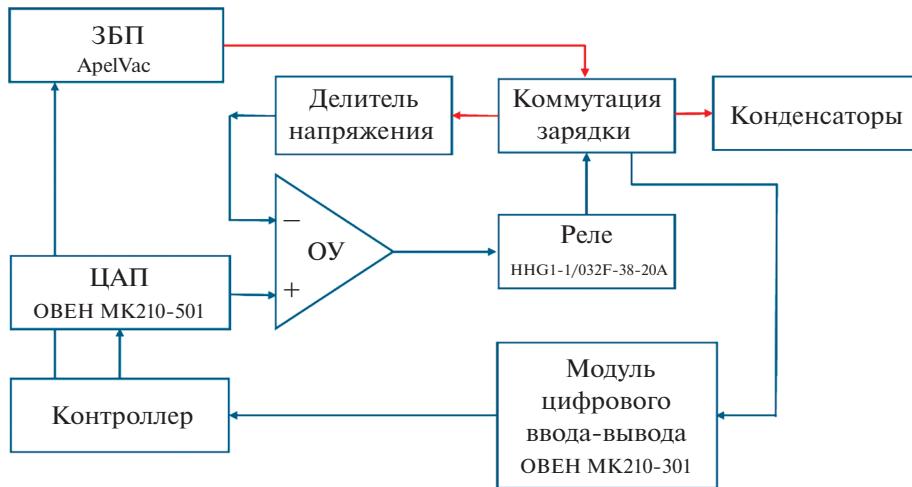


Рис. 4. Условная схема управления БРП.

батарей и обеспечивает механическую развязку каналов ЗУ друг с другом, с ПРУ и с ЗБП по окончании процесса зарядки.

2.2. Управление коммутацией БРП

Благодаря использованию твердотельных реле с низким минимальным уровнем управляющего напряжения открытия (от 3 В) управление схемой коммутации БРП может быть осуществлено с помощью большинства современных модулей ввода-вывода или микроконтроллеров. В то же время, для повышения отказоустойчивости системы в условии возможных электромагнитных помех при срабатывании пускателей управление процессом зарядки было организовано на одном счетверенном операционном усилителе (ОУ) "LM339N", работающем в режиме компаратора.

Схема управления представлена на рис. 4. Подача опорного напряжения, соответствующего желаемому уровню зарядки конкретной конденсаторной батареи, на неинвертирующий вход ОУ производится с помощью ЦАП "ОВЕН МУ210-501", управляемого внешним удаленным контроллером. Текущее напряжение на конденсаторной батарее подается на инвертирующий вход ОУ через омический делитель напряжения. Когда напряжение на инвертирующем входе ОУ превышает уровень опорного напряжения, ОУ переключается из логической единицы в логический ноль и выключает твердотельное реле, которое в свою очередь производит отключение электромагнитного пускателя КМ и, соответственно, прекращение зарядки конденсаторной батареи через данный канал БРП.

Делитель напряжения подобран таким образом, чтобы максимальное значение напряжения ЗБП после делителя было немного меньше мак-

симального напряжения ЦАПа, что позволило при уровне зарядного напряжения до 5 кВ достичь точности установки напряжения порядка 5 В. При этом связь опорного напряжения с ЦАПа с напряжением на батарее определялась путем одноразовой калибровки и записывалась в виде коэффициента во внешний контроллер.

Представленная схема также предусматривает независимый контроль состояния пускателей за счет использования одной нормально разомкнутой контактной группы, не задействованной непосредственно в зарядке. Состояние этой группы отслеживается датчиком типа "сухой контакт" модуля цифрового ввода-вывода МК210-301.

2.3. Типичная динамика зарядки конденсаторных батарей

Пример типичной динамики изменения напряжения на ряде конденсаторных батарей токамака МИФИСТ от времени при зарядке от описанного выше БРП представлен на рис. 5. Измерение напряжений на батареях производилось с помощью системы мониторинга на базе АЦП "ADS1115" с омическими делителями напряжения. Горизонтальными линиями показаны уставки напряжения зарядки на БРП, а вертикальными – зарегистрированные моменты выключения зарядных контакторов БРП. При этом, в виду того, что графики формировались из реляционной базы данных с частотой записи, определяемой порогом изменения сигнала и составляющей порядка пяти секунд, возможно небольшое рассогласование между выходом на плато напряжения и вертикальными линиями, а также моментами сброса энергии с различных батарей.

Как видно из рис. 5, после замыкания КМ всех групп катушек потенциалы на их конденсатор-

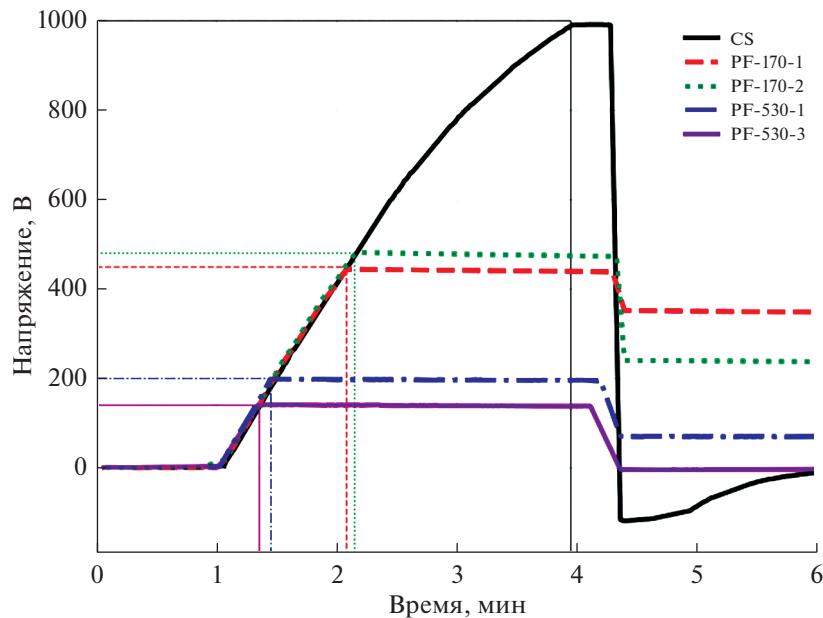


Рис. 5. Зависимость напряжения на ряде конденсаторных батарей токамака МИФИСТ от времени при зарядке от БРП. Горизонтальными линиями показаны предзаданные в БРП уровни желаемого напряжения на батареях, а вертикальными – измеренное время размыкания контактной группы БРП соответствующей батареи.

ных батареях фактически оказываются одинаковыми на протяжении зарядки. Независимо от соотношения емкостей батарей размыкание КМ происходит в порядке увеличения уставок напряжения. При этом для контактных групп КМ, соответствующих батареям катушек PF-170 и PF-530, разность потенциалов при размыкании вовсе будет отсутствовать, а для CS она будет равна разнице напряжения на ЗБП и уставки в 1 кВ. Таким образом, принципиально возможно ускорение зарядки путем выставления изначально более высокого напряжения на ЗБП и его снижения по мере размыкания контактных групп, чтобы к моменту размыкания последней разность потенциалов была в пределах номинала для КМ.

В силу малых токов утечки используемых конденсаторов после размыкания их потенциал не меняется существенно (менее 5 В) вплоть до инициирования разряда. Как видно, уровень достигаемого напряжения на конденсаторах немного ниже уставки. Расхождение составляет менее 2% от уставки напряжения и, вероятно, обусловлено неидеальной калибровкой БРП. Примечательно, что после осуществления рабочего импульса на батарее центрального соленоида наблюдается небольшая переполюсовка и медленная разрядка до нуля. В свою очередь, на ряде батарей полоидальных катушек напряжение сохраняется. Однако благодаря использованию на выходе БРП высоковольтных диодов повторная зарядка возможна даже в условии наличия остаточного напряжения

на батареях, как положительного, так и отрицательного.

3. СИСТЕМА БЛОКИРОВКИ ЗАПУСКА

В силу учебной направленности установки, подразумевающей участие низкоквалифицированного персонала (студентов младших курсов), на МИФИСТе особое внимание уделяется средствам обеспечения безопасности жизнедеятельности. В качестве одного из средств защиты персонала на токамаке была внедрена система автоматической блокировки запуска и работы узлов, способных нанести вред здоровью при нахождении персонала в экспериментальном зале с установкой. Задача данной системы сводится к выключению подобных узлов при срабатывании датчиков открытия дверей экспериментального зала с установкой, либо по команде с пультовой и предотвращению их повторного запуска до соответствующей команды с пультовой.

Схема системы блокировок представлена на рис. 6. В исходном состоянии двери экспериментального зала с установкой и помещения конденсаторной закрыты, и соответствующие им концевые выключатели D11–D1n замкнуты. Контактор KM11 выключен, соответственно:

- контактная группа KM11.1 разомкнута, поэтому самоподхват KM11 неактивен;
- контактная группа KM11.2 разомкнута и коммутаторы SW1–SW3 системы сброса энергии

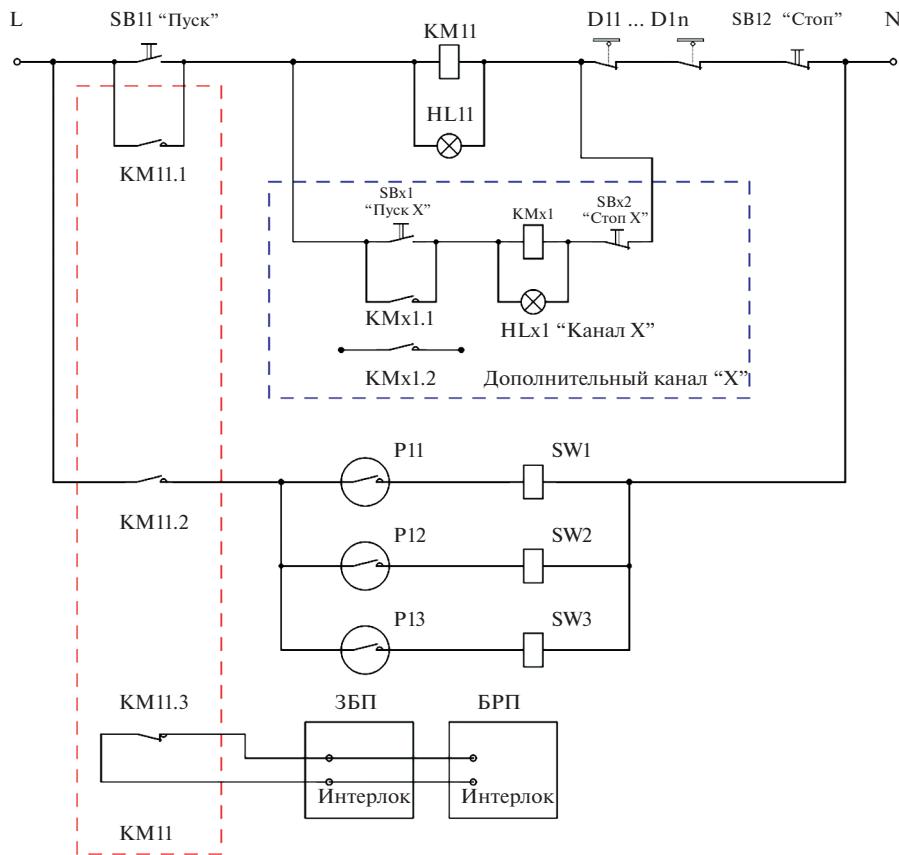


Рис. 6. Схема системы блокировки запуска на токамаке МИФИСТ.

САСЭ замкнуты, что делает зарядку конденсаторов С1–С3 невозможной;

- контактная группа KM11.3 замыкает контакты “интерлок” ЗБП – при таком состоянии контактов подача питания блоком зарядки невозможна, запуск БРП также заблокирован.

В рабочем режиме нажатие кнопки SB11 “Пуск” подает питание на катушку KM11. Это приводит к замыканию контактной группы KM11.1, вследствие чего питание катушки пускателя поступает параллельно кнопке SB11 “Пуск” и теперь не зависит от состояния кнопки SB11 “Пуск”, а самоподхват активен до открытия любой двери D11–D1n или до нажатия кнопки SB12 “Стоп”. Также происходит замыкание контактных групп KM11.2, что делает возможным размыкание коммутаторов SW1–SW3 САСЭ через дистанционно управляемые реле Р11–Р13 на базе модуля “ОВЕН МК210-401”, и, соответственно, позволяет начать зарядку конденсаторов С1–С3 при условии, что также включены соответствующие реле Р. Наконец, одновременно с SB11 размыкается контактная группа KM11.3, что делает возможным подачу питания с ЗБП и запуск БРП.

Открытие любой из дверей D11–D1n в рабочем режиме, равно как и нажатие кнопки SB12

“Стоп”, приводят к обесточиванию контактора KM11, соответственно:

- контактная группа KM11.1 оказывается разомкнутой, что деактивирует самоподхват;
- контактная группа KM11.2 размыкается и отключает питание коммутаторов SW1–SW3 (независимо от состояния дистанционно управляемых реле Р11–Р13). Это приводит к тому, что контакты 1 и 2 коммутаторов SW замыкают цепь САСЭ конденсаторов С1–С3. Происходит сброс энергии с батареи;
- контактная группа KM11.3 размыкает цепь интерлока ЗБП и БРП, что обеспечивает механический разрыв ЗБП, БРП и батареи, а также выключение подачи напряжения с ЗБП.

Функционал системы блокировок может быть расширен дополнительными каналами “Х”, которые получают питание после самоподхвата основного контактора KM11, всех дверей и кнопки SB12 “Стоп” и оказываются “внутри” основного контура блокировок: он может быть активирован/деактивирован своими кнопками управления после включения основной блокировки и обесточивается в аварийном режиме или при выключении основной блокировки. При этом, в его состав могут входить контакторы KMx с произ-

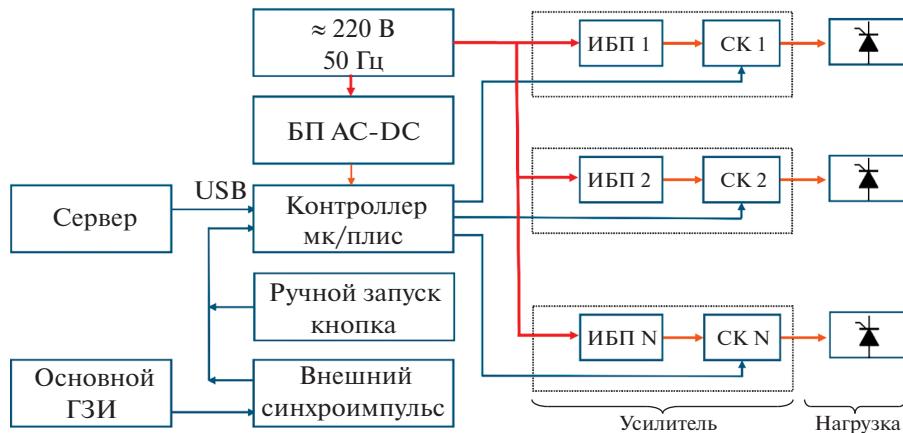


Рис. 7. Общая схема ГЗИ для управления тиристорными ключами токамака МИФИСТ. ИБП – импульсный блок питания, СК – система коммутации.

вольной комбинацией нормально замкнутых и нормально разомкнутых контактов. Подобные дополнительные каналы задействованы для включения в систему блокировок потенциально опасных для здоровья персонала узлов установки, не связанных непосредственно с зарядкой батарей ЭМС, в частности, диагностических лазеров и излучателя системы СВЧ-предионизации.

4. СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ ЗАДЕРЖАННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Задействованные в ЭМС токамака в качестве силовых ключей тиристорные коммутаторы привлекательны относительно низким напряжением управления. В то же время, отпирающий ток управления для них составляет более 250 мА [20], что превышает возможности стандартных серийно производимых многоканальных генераторов задержанных импульсов (ГЗИ). В связи с этим, для обеспечения последовательного управляемого запуска силовых тиристоров ЭМС токамака МИФИСТ был разработан собственный ГЗИ, обеспечивающий необходимые для задействованных тиристоров параметры питания и отличающийся простотой, низкой стоимостью изготовления, возможностью оперативной замены компонентов и, что самое главное, реализацией гальванической развязки выходных каналов синхронизации с бытовой сетью питания и цепями управления.

Общая схема созданного блока представлена на рис. 7. Можно условно разделить его на две группы устройств: контроллер, который непосредственно генерирует синхроимпульсы нужной ширины и задержки, но слабой мощности, и драйверы, функционирующие как усилители сигнала, обеспечивающие одновременно гальваническую развязку цепей их питания и управления с выходной цепью подачи сигнала на тиристоры.

4.1. Модуль запуска тиристорных ключей

В качестве модуля запуска отдельного тиристорного ключа была выбрана классическая схема трансформаторного АС-DC преобразователя, реализованного на базе понижающего тороидального трансформатора “ТОРЭЛ ТТП-3” с выходным напряжением 9 В и диодного моста “GBT2504” (рис. 8). Используемый трансформатор обеспечивает изоляцию цепи модуля, гальванически связанный с ЭМС токамака, от электросети питания лаборатории. Согласно паспорту, рабочее напряжение изоляции трансформатора составляет 3 кВ, однако на практике оно оказывается еще более высоким. Для унификации ГЗИ, используемых на токамаке для запуска различных устройств, в модуль запуска на выход АС-DC преобразователя был добавлен стабилизатор напряжения “LM317”, позволяющий плавно регулировать уровень выходного напряжения в диапазоне от 1.2 В до уровня, близкого к номинальному после выпрямления, составляющему около 12 В, с помощью потенциометра RV1. Таким образом, стало возможным применение блока не только для коммутации силовых тиристоров, но и для синхронизированного запуска диагностического оборудования, рассчитанного на уровни TTL, CMOS или LV-TTL. При этом ввиду того, что “LM317” несколько снижает предельное напряжение, предусмотрена возможность его отключения от цепи питания через переключатели J1 и J3. Для фильтрации выходного напряжения после стабилизатора напряжения предусмотрена небольшая батарея низковольтных электролитических конденсаторов с общей емкостью 500 мкФ, а также шунт на 1 МОм для их плавной разрядки при обесточивании блока.

В качестве системы коммутации использована комбинация оптопары с выходом на триггер Шмитта “H11L1” и Р-канального МОП-транзистора “AO4419”. В отсутствии разности потенци-

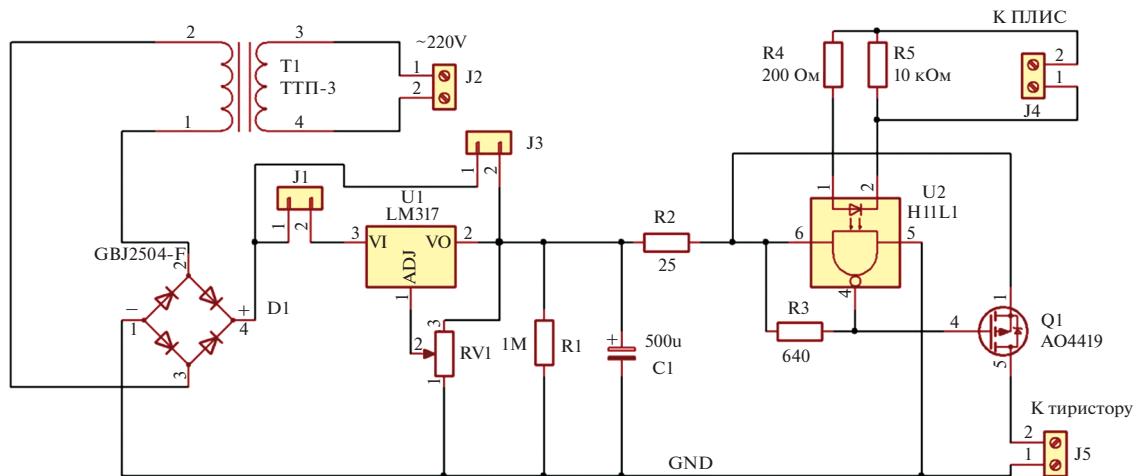


Рис. 8. Электрическая схема модуля запуска тиристорного ключа.

алов на управляющем входе J4 на затвор 4 транзистора Q1 подается потенциал через сопротивление R3 и Q1 оказывается открытым, коммутируя ИБП на нагрузку J5. В случае протекания тока через светодиод оптопары U2 выход 4 оптопары U2 находится под потенциалом входа 5, что соответствует закрытому состоянию Q1. Сама по себе оптопара не предназначена для коммутации больших токов, для чего, собственно, и необходим транзистор Q1, рассчитанный на токи до 10 А. Время открытия для оптопары U2 составляет 1 мкс (для транзистора Q1 – 10 нс), что является достаточным для нужд управления магнитными катушками токамака МИФИСТ-0.

Характерное минимальное время между каналами можно дополнительно сократить, подобрав для всех каналов оптопары U2 со схожим временем открытия, либо измерив его для каждого модуля и впоследствии учитывая измеренную задержку открытия в контроллере. В случае, если достаточны времена открытия порядка 1 мс, плата может быть упрощена путем замены U2 и Q1 на фотоэлектрическое твердотельное реле на МОП транзисторах “PVT412A”, отличающееся относительно высоким током нагрузки до 0.36 А и помимо коммутации обеспечивающее гальваническую развязку с цепью управления до 4 кВ.

Следует отметить, что представленная схема модуля запуска может быть оптимизирована, в частности, ряд компонентов может быть заменен на более дешевые для согласования максимально достижимого тока, определяемого на текущий момент мощностью трансформатора. Тем не менее, даже с учетом текущих компонентов стоимость одного модуля позволяет осуществлять относительно безболезненное масштабирование числа каналов синхронизации и дублировать сам блок.

4.2. Модуль генерации задержек

Модуль генерации задержек был сделан на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), которая архитектурно позволяет по умолчанию реализовывать независимую работу каждого канала запуска. ПЛИС, будучи заведомо более универсальным устройством, которое, в частности, позволяет эмулировать архитектуру микропроцессорного ядра, на практике оказывается более узкоспециализированным, что, возможно, обусловлено их относительно более высокой стоимостью и высоким порогом входа. В то же время, общая тенденция на появление средств снижения порога входа в программирование контроллеров не обошла стороной и ПЛИС. Так, конфигурирование ПЛИС может производиться не на стандартных для отрасли узкоспециализированных языках SystemVerilog или VHDL, а с использованием фреймворка LiteX [21], который позволяет конфигурировать ПЛИС при помощи предметно ориентированного языка Migen – расширения языка Python. Кроме того, данный фреймворк имеет в своем составе уже написанный и легко подключаемый модуль для коммуникации с ПЛИС по интерфейсам UART, PCI или Ethernet, что дает возможность сосредоточиться на написании логики работы ПЛИС, а не на встраивании так называемых IP-ядер для различных интерфейсов или же их написании с нуля. Минусом является требования к довольно большому количеству базовых атомарных единиц вычисления (таблиц поиска или LUT). Исходя из этого, написание логики работы для модуля генерации задержек производилось с помощью фреймворка LiteX.

Реализация запуска отдельных драйверов созданного ГЗИ была осуществлена на базе платы “Sipeed Tang Nano 9K”, основным компонентом которой является ПЛИС “GW1NR-9” фирмы Gowin с тактовой частотой 27 МГц и 8640 логиче-

скими элементами. Прошивка платы представляет из себя 10 независимых конечных автоматов (по числу каналов ГЗИ) с пятью состояниями каждый (см. рис. 9). Состояние “idle” позволяет независимо устанавливать время включения и выключения канала относительно тактового сигнала, а также полностью отключать канал. Для избежания случайных срабатываний от наводок на вход внешней синхронизации ГЗИ добавлено состояние “prepare”, которое проверяет, что длительность сигнала триггера превышает 20 тактов ПЛИС. Также для избежания частого срабатывания, например, при случайном многократном нажатии кнопки запуска в панели управления пользователем, добавлено состояние “wait”, ограничивающее число запусков импульсов одним разом в секунду.

4.3. Типичные формы сигнала ГЗИ

Пример сигналов на выходе ПЛИС и на выходе модулей запуска для двух каналов ГЗИ представлен на рис. 10. Можно отметить несколько особенностей. Наблюдается задержка между сигналом с ПЛИС и сигналом на выходе драйвера, составляющая для обоих каналов 500 нс. Задержка, вероятно, обусловлена временем срабатывания элемента “H11L1” модуля запуска, при этом она меньше типичного значения в 1 мкс, указанного в паспорте данного оптореле. Задержка сигнала между каналами 1 и 2 четко соответствует предзданной 1 мкс. Фронт нарастания сигнала после усиления крутой (порядка десятков нс), при этом в случае нагрузки на 50 Ом достигается уровень напряжения около 8 В (рис. 10а). Максимальный уровень напряжения модуля составляет примерно 12 В и практически реализуется лишь при высокомомной нагрузке. С учетом наличия токоограничивающего сопротивления R2 в цепи модуля запуска (см. рис. 8), составляющего 25 Ом, при нагрузке в 50 Ом получается омический делитель с коэффициентом 2/3. В принципе, возможно достижение большего выходного напряжения на низкомомной нагрузке путем удаления резистора R2, что, однако, чревато выходом из строя элементов модуля усилителя при коротком замыкании на выходе J5. Как видно на рис. 10б, при подключении к ГЗИ тиристоров, используемых в ЭМС токамака МИФИСТ, в ходе подачи импульса имеет место существенная просадка напряжения, при этом на осциллограмме наблюдается переходный процесс открытия затвора тиристора длительностью около 400 нс.

Спад управляющего сигнала на выходе ГЗИ оказывается существенно затянутым по сравнению с фронтом, хотя его максимальное время в 2 мкс находится в пределе паспортных значений времени закрытия используемого в усилителе оптореле. В целом, в рамках задач коммутации тиристо-

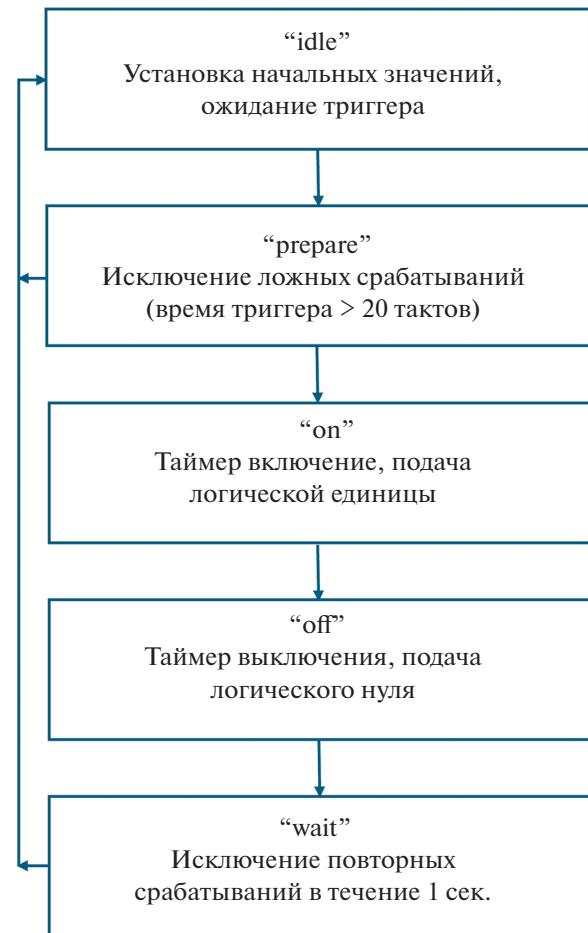


Рис. 9. Схема состояний автомата ПЛИС в ГЗИ.

ров и запуска диагностик на токамаке МИФИСТ форма и длительность спада оказывается менее существенной, чем фронта. Можно отметить, что достигнутые характеристики ГЗИ полностью отвечают требованиям по синхронизации работы узлов токамака МИФИСТ и, в частности, электромагнитной системы. Созданный блок ГЗИ получился легко масштабируемым, собран на основе доступных, легко заменяемых компонентов и обеспечивает гальваническую развязку цепей его питания и управления с цепями ЭМС токамака на напряжение более 3 кВ.

5. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ РАБОТЫ ЭМС ПРИ СТАНДАРТНЫХ ИМПУЛЬСАХ ПЛАЗМЫ

Алгоритм типичной работы токамака МИФИСТ следующий. Оператор задает напряжения зарядки конденсаторных батарей ЭМС, напряжение на выходе ЗБП, задержки между запуском каналов ГЗИ, управляющего тиристорами ЭМС, тип и давление рабочего газа, время и мощность системы сверхвысокочастотной (СВЧ) пре-

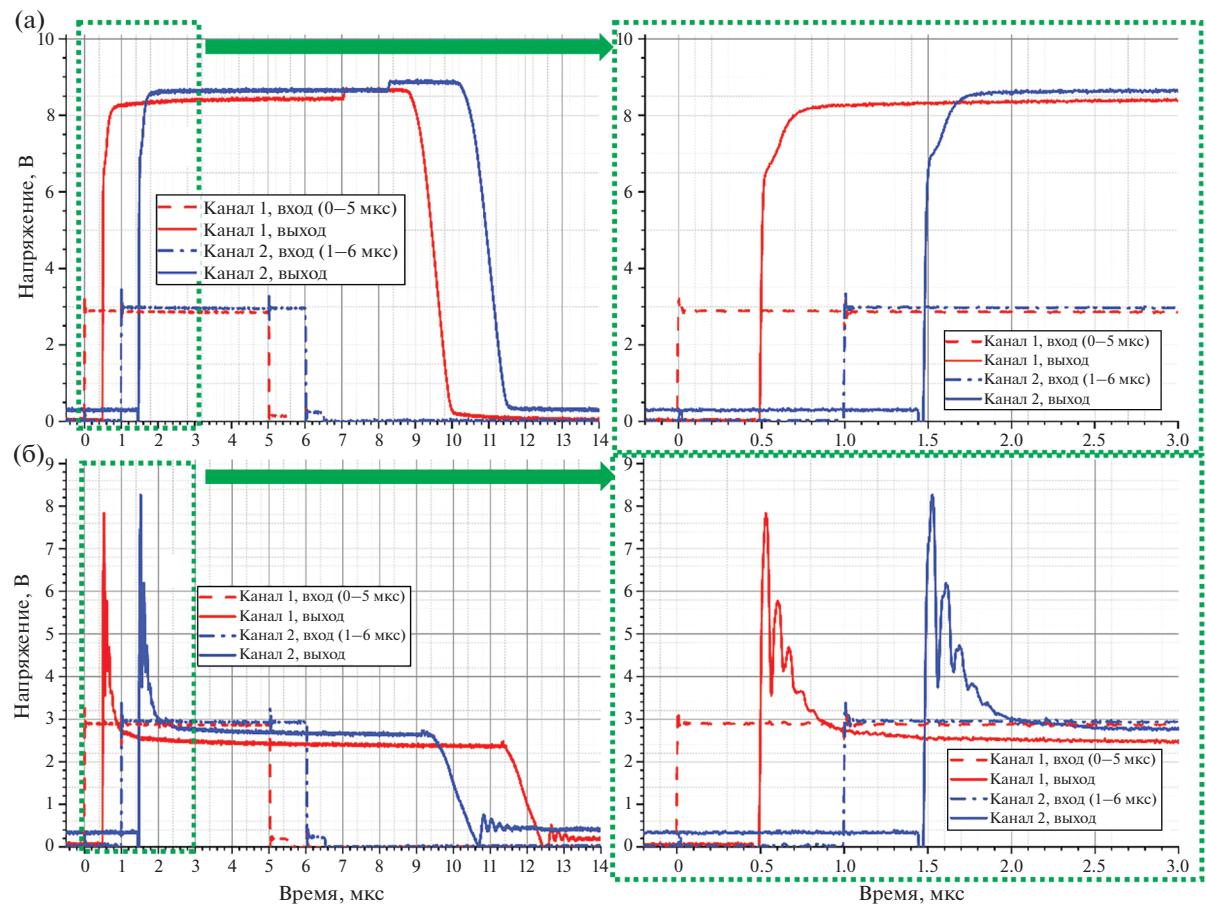


Рис. 10. Осциллограммы двух каналов ГЗИ на входе (штриховыми линиями) и выходе (сплошными линиями) модулей запуска с нагрузкой 50 Ом (а) и нагруженных на тиристоры (б).

дьюонизации. После запуска БРП контакторы каналов зарядки оказываются замкнутыми, однако фактическая зарядка начинается после подачи питания с ЗБП, что осуществляется командой от оператора в панели управления установкой.

Установка и подача напряжения с ЗБП после запуска БРП может быть автоматизирована в ЕР-ICS с помощью машины состояний, однако, контроль и запуск различных силовых блоков оператором, а не автоматикой, на текущем этапе функционирования установки представляется более безопасным. Далее БРП осуществляет сравнение напряжений зарядки, заданных пользователем для всех батарей, с текущим и автоматическое размыкание КМ по достижению необходимых напряжений. Подразумевается, что этот процесс также контролируется оператором, который в случае внештатной ситуации может подать сигнал в БРП на размыкание всех КМ, что приводит к отключению реле Р1 на рис. 3 и разрыву нейтрали в цепи управляющих групп КМ.

Для запуска импульса плазмы оператор подает команду “Триггер” на основной ГЗИ, который запускает систему СВЧ-предионизации, ряд диа-

гностических узлов и подает синхроимпульс на ГЗИ ЭМС токамака, который в соответствии с уставками задержек открывает тиристоры, коммутирующие батареи на магнитные катушки. По окончании импульса оператор может замкнуть переключатели САСЭ для вывода напряжения на батареи в ноль либо начать зарядку с остаточным напряжением.

Пример типичной динамики токов в катушках ЭМС токамака МИФИСТ-0 при стандартном разряде с СВЧ-предионизацией на прототипе представлен на рис. 11. Вертикальными штрих-пунктирными линиями показаны моменты запуска каналов ГЗИ, соответствующих батареям катушек аналогичного цвета. При этом для полоидальных катушек PF170 и PF530 предусмотрено по 3 батареи для конфигурирования формы тока в катушках, необходимого для управления положением плазменного шнуря.

Токонесущая плазма существует около 3 мс, а максимальный ток достигает 4.2 кА. На текущий момент время разряда ограничено возможностями управления плазменным шнуром, в связи с чем идет внедрение системы формирования про-

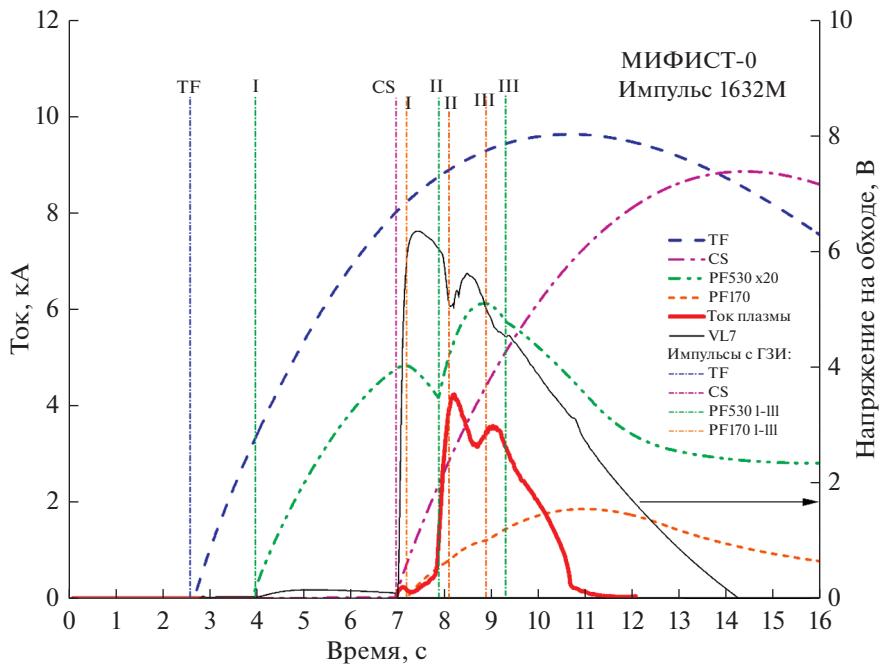


Рис. 11. Осциллограммы токов в различных катушках ЭМС токамака МИФИСТ и напряжения на обходе от времени. Вертикальными линиями показаны моменты запуска различных каналов ГЗИ. TF – катушка тороидального поля, CS – центральный соленоид, PF – катушки полоидального поля, VL7 – петля измерения напряжения на обходе.

извольного импульса тока в полоидальных катушках по принципу широтной-импульсной модуляции на основе IGBT-транзисторов, которая обеспечит более гибко настраиваемую форму по сравнению с текущей системой на базе трех батарей, разово коммутируемых на нагрузку тиристорами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена разработка и испытание системы питания ЭМС токамака МИФИСТ-0. Описаны задействованные подходы и результаты их испытаний. При создании системы основной акцент был сделан на возможности масштабирования путем реализации узлов в виде модулей; на высокую степень отказоустойчивости, достигаемую большим запасом прочности по токам и напряжениям компонентов, а также гальванической развязкой силовых и управляющих цепей установки; на ремонтопригодность системы, достигаемую выбором недорогих и широкодоступных на отечественном рынке компонентов. Также для реализации возможности быстрого ремонта и модернизации системы множество узлов были изготовлены самостоятельно.

Предложена конструкция многоканального блока последовательно-параллельной зарядки конденсаторных батарей от общего источника напряжения, рассчитанного на зарядные напряжения до 5 кВ, ток до 16 А и обеспечивающего механический разрыв линии зарядки с нагрузкой. Также

предложен десятиканальный ГЗИ, обеспечивающий импульсы с шириной от 1 мкс и задержками от 1 мкс до 1 с с варьируемым напряжением от 1.2 до 12 В и током до 300 мА. Предложенный ГЗИ обеспечивает гальваническую развязку линий внешней синхронизации, линий питания и управления с выходными каналами на напряжение более 3 кВ, а также гальваническую развязку каналов друг с другом.

Созданные узлы показали свою функциональность на протяжении нескольких тысяч рабочих импульсов на установке. Представленные в работе подходы и конечные устройства могут быть применены на схожих небольших электрофизических установках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИР “Исследования в области взаимодействия плазмы с обращенными к плазме элементами на учебно-демонстрационной установке типа “токамак” в НИЯУ МИФИ с привлечением студентов и аспирантов” (дополнительное соглашение № 075-03-2023-097/4 от 17.04.2023 г. к Соглашению № 075-03-2023-097 от 13.01.2023 года), выполняемого в рамках федерального проекта № 3 “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий” комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 г.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Krat S. et al. // *Fusion Sci. Technol.* 2023. P. 1–19. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2149033>
2. Крат С.А., Пришивицын А.С., Алиева А.И., Ефимов Н.Е., Виницкий Е.А., Булгадарян Д.Г., Воробьев Г.М., Курнаев В.А. // Ядерн. физ. инжинир. 2022. Т. 13 (1). С. 43–52. <https://doi.org/10.56304/S2079562922010201> [Krat S.A., Pryshvitsyn A.S., Alieva A.I., Efimov N.E., Vinitskiy E.A., Bulgadaryan D.G., Vorobyov G.M., Kurnaev V.A. // *Phys. At. Nucl.* / 2021. V. 84. № 12. P. 1995–2003. <https://doi.org/10.1134/S1063778821120024>].
3. Ovsyannikov D.A., Ovsyannikov A.D., Zhabko A.P., Veremey E.I., Vorobyov G.M., Zavadskij V.M. // Proc. 2005 Int. Conf. Physics and Control /2005. Saint Petersburg, Russia. 2005. P. 75–79. <https://doi.org/10.1109/PHYCON.2005.1513954>.
4. Ahmad Z., Ahmad S., Naveed M.A., Deeba F., Javeed M.A., Batoor S., Hussain S., Vorobyov G.M. // *Phys. Scr.* 2017. V. 92 (4). P. 045601. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa6458>
5. Vinitskiy E., Ulasevich D., Prishvitsyn A., Efimov N., Krat S., Khayrutdinov R. // *Fusion Sci. Technol.* 2024. V. 81 (5). P. 485–494. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2431782>
6. Vinitskiy E.A., Efimov N.E., Prishvitsyn A.S., Sorokin I.A., Krat S.A. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2024. V. 66 (1). P. 015004. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ad0d87>
7. Ulasevich D.L., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E., Alieva A.I., Prishvitsyn A.S., Efimov N.E., Krat S.A. // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86 (7). P. 1555–1563. <https://doi.org/10.1134/S1063778823070244>
8. Zhu L., Huang L., Fu P., He S., Wang G., Chen X., Wang Z., Li L. // *Fusion Eng. Des.* 2021. V. 172. P. 112757. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112757>
9. Khostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N., Injutin N.V., Krylov V.A., Levin I.V., Mineev A.B., Sokolov M.M. // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83 (7). P. 1037–1057. <https://doi.org/10.1134/S1063778820070078>
10. Zarva D.B. et al. // *PAST-TF*. 2018. V. 41. № 2. P. 59–70. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2018-41-2-59-70>
11. Neumeyer C. et al. // 25th IEEE Symp. Fusion Engineering (SOFE). San Francisco, CA, USA. 2013. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/SOFE.2013.6635287>.
12. Lampasi A., Minucci S. // IEEE Int. Conf. Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Italy. 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977851>.
13. Meshcheryakov A.I., Grishina I.A. // *Plasma Phys. Rep.* 2022. V. 48 (10). P. 1057–1061. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22600451>
14. Agredano-Torres M. et al. // *Fusion Eng. Des.* 2021. V. 168. P. 112683. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112683>
15. Grover O., Kocman J., Odstrcil M., Odstrcil T., Matusu M., Stöckel J., Svoboda V., Vondrasek G., Zara J. // *Fusion Eng. Des.* 2016. V. 112. P. 1038–1044. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.05.009>
16. Hussain S. et al. // *J. Fusion Energy*. 2016. V. 35 (3). P. 529–537. <https://doi.org/10.1007/s10894-015-0052-z>
17. Mirzaei H.R., Amrollahi R. // *J. Fusion Energy*. 2019. V. 38 (5–6). P. 548–556. <https://doi.org/10.1007/s10894-019-00227-3>
18. Rehman O.A., Ahmad S., Javed M.A., Ahmad N., Khosa A.M., Qayyum A., Naveed M.A. // *Radiat. Eff. Defects Solids*. 2024. P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/10420150.2024.2364181>
19. Efimov N., Podolyako F., Prishvitsyn A., Krat S. // *Fusion Eng. Des.* 2023. V. 196. P. 113990. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113990>
20. Тиристор силовой Т293-5000. 2024. <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/t293/t293-5000.html>
21. Фреймворк Litex. 2024. <https://github.com/enjoy-digital/litex>

MEPhIST-0 Tokamak Power Supply System of Electromagnetic Coils

N. E. Efimov^{1, *}, F. S. Podolyako¹, I. I. Pashkov¹, A. S. Prishvitsyn¹,
I. A. Sorokin^{1,2}, V. V. Vaitonis¹, and S. A. Krat¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch),
Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow obл., 141190 Russia

*e-mail: neefimov@mephi.ru

Received November 7, 2024; revised November 19, 2024; accepted November 22, 2024

Abstract—The paper describes the development and testing of the power supply system for the coils of the educational and research tokamak MEPhIST, which includes capacitor banks, automated charging systems, state monitoring, synchronized switching of the banks to the toroidal and poloidal field coils, and the central solenoid, as well as protection systems. The technical aspects of the developed system are considered in detail from the standpoint of simplicity, scalability, fault tolerance, maintainability, as well as the possibility of modification. The implemented solutions, including the schematic diagrams, designed boards, and modules, can be useful for electromagnetic facilities with similar parameters and tasks.

Keywords: tokamaks, pulse power supply systems, delay generators, automation