

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С 345
С-506

9 - 5238 A

А.А. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
И ОПЫТ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
ДУБНЕНСКОГО СИНХРОФАЗОТРОНА НА 10 ГЭВ

Специальность 280 - электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований:

Научный руководитель:
кандидат технических наук Л.Н. Беляев

Официальные оппоненты:
доктор технических наук старший научный сотрудник А.М. Столов
кандидат физико-математических наук профессор Т.А. Суетин

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий.

Автореферат разослан 1970 года.

Защита диссертации состоится 1970 года на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий.

Адрес: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, конференц-зал Лаборатории высоких энергий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ.

Ученый секретарь Совета

С.В. Мухин

9 - 5238

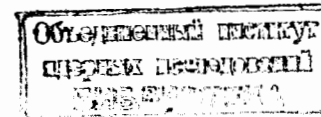
А.А. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
И ОПЫТ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
ДУБНЕНСКОГО СИНХРОФАЗОТРОНА НА 10 ГЭВ

Специальность 280 - электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

7070 60



Для возбуждения магнитов протонных синхротронов требуются системы питания очень большой мощности.

Так как колебания потребляемой энергии в течение ускорительного цикла весьма велики, то непосредственное подсоединение системы питания к энергосети неприемлемо. Поэтому используются различного вида накопители энергии.

Экономически целесообразным для питания электромагнитов протонных синхротронов оказалось применение систем, состоящих из электромашинных агрегатов с большими маховыми массами (асинхронный двигатель - маховик - синхронный генератор), работающих в паре с вентильным преобразователем.

Поскольку эффективность использования ускорителя в значительной мере определяется работой всей системы питания и в особенности ее вентильного преобразователя, то вопросы усовершенствования и безаварийной эксплуатации последнего являются чрезвычайно важными и первостепенными.

Первые годы эксплуатации после запуска в 1957 году дубненского синхрофазотрона на 10 ГэВ показали необходимость тщательного исследования аварийных процессов, протекающих в системе питания, и разработки эффективных защит, способных предотвратить разрушения оборудования, вызываемые протеканием больших аварийных токов по элементам преобразователя.

Одновременно в период с 1957 года по 1960 год велись работы по созданию систем дистанционной индикации вентилей, вызывающих частые отключения преобразователя, и быстродей-

ствующей импульсной токовой защиты мостов преобразователя. Эти работы, в конечном счёте, позволили снизить общий процент простоя и потерь рабочего времени ускорителя из-за неполадок в системе питания до 1 - 2%.

В связи с развитием новых методик исследования в физических экспериментах на базе различной электронной аппаратуры и искровых камер появилась необходимость в разработке новых устройств фазового управления вентильным преобразователем для создания сложных режимов работы системы питания, при которых ток возбуждения, а соответственно и поле в зазоре электромагнита ускорителя, поддерживается приблизительно постоянным в течение некоторого момента времени.

В результате этих разработок, проведенных в период с 1963 года по 1967 год, возникли новые режимы работы системы питания, которые позволили в одном цикле ускорения совместить одновременное проведение нескольких физических экспериментов с электронными и камерными методиками исследований, тем самым значительно повысить эффективность использования ускорителя.

Важным мероприятием по дальнейшему повышению эффективности ускорителя явилось создание системы подавления пульсаций в выпрямленном напряжении преобразователя, введенной в эксплуатацию в 1969 году.

Диссертация, состоящая из четырех глав, является попыткой обобщения вышеупомянутых работ, выполненных в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ с 1957 года по 1969 год.

Первая глава диссертации посвящена исследованию аварийных процессов, происходящих в вентильном преобразователе системы питания, и разработке защит.

Однофазное опрокидывание инвертора является одной из главных причин, приводящих к перерыву в работе системы питания магнита ускорителя.

На примере однофазного опрокидывания инвертора из-за незавершенной коммутации тока в одном из мостовых преобразователей системы питания показан ход развития аварийного процесса, доказана невозможность самовосстановления инверторного режима на преобразователе при общем выпрямленном токе более 7 ка и линейном напряжении на синхронных генераторах системы питания 7,2 кв.

Здесь же приводится анализ работы проектной системы защиты. Рассматривается работа уравнивающих реакторов преобразователя. В зависимости от момента включения замыкателя по отношению к фазе линейного напряжения синхронного генератора определяется ток нагрузки преобразователя, достигающий в некоторых случаях величины 28000 а. Через каждый игнитрон реальной схемы преобразователя системы питания при этом протекает ток более 3,5 ка. Показана возможность разряда запасенной энергии магнитного поля ускорителя в контуре: электромагнит - вентили преобразователя - обмотки синхронного генератора системы питания. Приводятся данные опытной эксплуатации системы питания с проектной защитой за 2800 часов работы.

На основе описанных выше исследований делается заключение о необходимости исключения из цепи замыкателя сопротивления и отказа от перевода в выпрямительный режим работы для вывода преобразователя из режима однофазного опрокидывания /1/.

Рассмотрена конструкция датчика однофазного опрокидывания, состоящего из трехстержневого трансформатора с пермалоевым сердечником и усилительной тиратронной схемы.

Приводятся осциллограммы эксперимента по опробованию новой защиты с короткозамыкателем на базе масляного выключателя типа МГГ-10: полное время работы датчика и короткозамыкателя от момента опрокидывания до замыкания главных контактов составляет 0,14 - 0,15 сек, время коммутации тока возбуждения электромагнита на мост, в котором произошло опрокидывание, - 5-6 мсек и т.д.

Приводятся опытные данные за десятилетний период эксплуатации.

В заключительной части этой главы рассматривается датчик двухфазного опрокидывания инвертора и импульсная максимальная быстродействующая токовая защита мостовых преобразователей системы питания.

Во второй главе рассмотрены системы дистанционной индикации вентилей, в которых возникают обратные зажигания или прямые пробой (прорыв) при работе в инверторном режиме. С помощью этих систем бракуются вентили, вызывающие за короткое время 5-7 аварийных отключений системы питания /2/.

Приводятся статистические данные о количестве отключений системы питания из-за обратных зажиганий и прорывов вентилей преобразователя за 13-летний период эксплуатации преобразователя.

При проектировании систем индикаций была учтена сложность электромагнитных процессов в схеме преобразователя. При разработке устройств в качестве основной задачи ставили отыскание неисправного вентиля, являющегося первопричиной возникшего аварийного режима на преобразователе, не отмечая вторичные явления.

В заключительной части главы рассматривается электронно-лучевой индикатор с фотоприставкой, с помощью которого в аварийных режимах снимаются осциллограммы выпрямленного напряжения преобразователя, необходимые при анализе работы устройств управления и защиты за длительные промежутки времени.

В третьей главе работы приведены общие требования, предъявляемые к системам фазового управления вентильного преобразователя системы питания протонного синхротрона, и рассмотрены две системы фазового управления для создания сложных режимов работы вентильного преобразователя.

Первая система разрабатывалась для осуществления сложных режимов системы питания с одной площадкой в токе возбуждения электромагнита ускорителя /3,4/.

Возросшие требования со стороны физического эксперимента, выразившиеся в повышении точности отсечки и поддержания напряженности магнитного поля в пределах $\pm 0,05 + 0,1\%$ в течение $400 + 500$ мсек на уровне 8 - 12,8 кэ, создание режима с двумя площадками в токе возбуждения электромагнита ускорителя и необходимость обеспечения условий для нормальной работы уравнивающих реакторов преобразователя в сложных режимах работы системы питания привели к разработке в 1967 + 1968 годах качественно новой схемы управления вентильного преобразователя дубненского синхрофазотрона на 10 Гэв.

На рис. 1 приведена функциональная схема этого устройства.

В этом устройстве применен вертикальный принцип управления. Однако в отличие от известных схем блок выпрямительных импульсов и блок импульсов для управления преобразователем в режиме "площадки тока" заменен 12-канальным фазосмещающим устройством (ФС). Вырабатываемые этим устройством импульсы в зависимости от величины управляющего напряжения, выдаваемого устройством УФР2 (связь 1), изменяют фазу в диапазоне $\alpha = 0 + 160$ град. эл.

Работа преобразователя (ВП) в выпрямительном режиме с различными углами регулирования, перевод преобразователя из выпрямительного режима в режим "площадок тока" и обратно, а также в инверторный режим осуществляется импульсами фазосмещателей при наименьшем уровне смещения на тиратронах схемы поджига вентилей преобразователя (СП), выдаваемого устройством УФР1, которое задает временные параметры рабочего цикла системы питания.

Программирование формы тока возбуждения и соответственно магнитного поля в зазоре электромагнита ускорителя ЭМ в процессе ускорения частиц осуществляется с помощью устройства УФР2.

Это устройство при переходе преобразователя из одного режима в другой изменяет выходное напряжение сравнения для схем фазосмещателей не скачкообразно, а плавно в течение 20 – 30 мсек, при этом коммутация тока вентильми преобразователя в это время не прекращается.

В процессе перевода преобразователя системы питания в инверторный режим работы фаза выходных импульсов фазосмещателей (ФС) изменяется до такого момента, что импульсы управления, вырабатываемые блоком инверторных пик-трансформаторов (БИПТ), начинают первыми зажигать тиратроны схемы поджига (СП). После этого по команде устройства УФР2 (связь 2) устройство УФР1 изменяет напряжение смещения в схеме поджига вентилей преобразователя (СП) до такой величины, что тиратроны этой схемы могут в дальнейшем поджигаться только импульсами блока инверторных пик-трансформаторов (БИПТ).

В период паузы, когда преобразователь с помощью устройства УФР1 запирается, устройство УФР2 (связь 3) переводится в исходное состояние с помощью датчика нуля тока (ДНТ). Вырабатываемое им напряжение сравнения соответствует в этом режиме такой величине, что фаза выходных импульсов фазосмещателей (ФС) соответствует неуправляемому выпрямительному режиму работы преобразователя системы питания (ВП).

В случае возникновения аварийных режимов защиты преобразователя, воздействуя на устройство УФР1, переводят преобразователь в инверторный режим без плавного перехода или запирают его в зависимости от характера аварийного процесса.

Для перевода преобразователя в режим "площадки тока" был использован интеграторный датчик уровня магнитного поля задающей аппаратуры ВЧ ускоряющей системы ускорителя, состоящий из интегратора (И1) и амплитудного селектора (АС). Выходной импульс, возникающий на определенном уровне магнитного поля (точность 0,1%), поступает в блок командных импульсов (БКИ), где усиливается и, воздействуя на УФР2, переводит преобразователь в режим "площадки тока" (связь 7). Одновременно этот импульс включает электронный ключ (ЭК) интегратора (И2).

Ответным импульсом напряжения (связь 9) на время длительности режима "площадки тока" включается релейный ключ (РК), с помощью которого выходное напряжение с интегратора-И2 (связь 10) подключается на вход регулятора уровня поля (Р). Выходное напряжение регулятора подается на сопротивление R (связь 12) и соответственно в схему сравнения фазосмещателей пик-генератора, образуя замкнутую в кольцо систему регулирования.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряженности магнитного поля в зазоре магнита ускорителя \dot{H} (нижняя осциллограмма) и ее производной \ddot{H} (верхняя осциллограмма) во время работы преобразователя системы питания в режиме "площадки тока" на уровне 12,8 кэ совместно со схемой регулятора.

Из осциллограммы видно, что отклонения \dot{H} составляют величину не более $\pm 1,0$ э.

Все устройства пик-генератора выполнены на полупроводниковых приборах. Наиболее ответственным узлом пик-генератора является фазосмещатель (ФС), который включает в себя генератор пилообразного напряжения (ГПН), диодно-регенеративную схему сравнения (СС) и выходной формирующий каскад на тиристоре (ВТК) – см. рис. 1.

Многочисленные испытания в статическом режиме показали, что возникающие за 6–8 часов непрерывной работы изменения относительно друг друга фаз управляющих импульсов не превышают $\pm 0,1$ град.эл. во всем диапазоне углов регулирования от 0 до 160 град. эл. при изменении температуры окружающего воздуха от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$.

Устройство УФР2 состоит из трехпозиционного триггера на тиристорах и источника опорного напряжения ^{15,6/}.

Применение рассмотренного пик-генератора в схеме управления преобразователя дубненского синхрофазотрона существенно улучшило последнюю, благодаря чему:

1. Осуществлены сложные режимы работы системы питания с одной и двумя площадками в токе возбуждения электро-

магнита ускорителя, как, например, режим, характеризуемый осциллограммами выпрямленного напряжения (верхняя осциллограмма) и тока преобразователя (нижняя осциллограмма) на рис. 3;

2. Стало возможным значительное уменьшение мощности межмостовых уравнивающих реакторов;

3. Производится динамическая разгрузка валов электромашиных агрегатов питания преобразователя;

4. Появилась возможность стабилизации выпрямленного напряжения преобразователя для осуществления длительных растяжек выведенного пучка моноэнергетических частиц.

В заключительной части этой главы анализируется работа уравнивающего реактора при управлении преобразователем от пик-генератора с плавным изменением фазы управляющих импульсов в переходные периоды.

В четвертой главе проведено краткое сравнение различных способов подавления пульсаций магнитного поля ускорителя, на основе чего сделан выбор системы подавления переменной составляющей в выпрямленном напряжении преобразователя с помощью подключающегося LC-фильтра во время работы преобразователя в режиме "площадки тока" (см. рис. 4).

Рассматривается предложенная методика расчёта основных элементов фильтра:

1. Определение допустимой средней величины выпрямленного напряжения преобразователя и амплитуды переменной составляющей для осуществления медленных растяжек вторичных пучков до 400-500 мсек при неравномерности высадки пучка $\pm 10\%$;

2. Проведение гармонического анализа переменной составляющей выпрямленного напряжения преобразователя;

3. Выбор индуктивностей, фильтра и расчёт емкости конденсаторной батареи;

4. Расчёт токов и напряжений в схеме LC-фильтра при переходном процессе, возникающем при включении фильтра в работу.

Проведенные по этой методике расчёты показали, что система подавления пульсаций должна иметь коэффициент подавления для составляющей 500 гц порядка 100, для составляющей 1000 гц - 200 и 1500 гц - 520.

Такое подавление получается при использовании в качестве индуктивностей LC-фильтра магнита М6-А в одном полюсе и четырех магнитов типа РО-2 в другом полюсе преобразователя с конденсаторной батареей емкостью 2000 мкф^{17/}.

В результате экспериментальных проверок было установлено, что в реальной схеме достигнуты расчётные коэффициенты подавления составляющих 500, 1000 и 1500 гц.

Осциллограммы выпрямленного напряжения U_d на выходе LC-фильтра и тока подключающих тиратронов, приведенные на рис. 5, характеризуют работу этого устройства.

Наиболее опасны для оборудования схемы LC-фильтра каскадные пробои в прямом направлении и обратные зажигания подключающих тиратронов при работе преобразователя системы питания соответственно в выпрямительном ($\alpha = 0$) и инверторном режимах. Возникающий при этом ток в тиратронах может иметь амплитуду до 3400 а, а напряжение на конденсаторной батарее и на электромагните ускорителя может достигнуть величины порядка 20 кв.

Учитывая тот факт, что собственная частота контура LC-фильтра значительно меньше частоты питающего напряжения преобразователя, аварийный ток и напряжение на конденсаторной батарее при прямом пробое подключающих тиратронов можно уменьшить до приемлемой величины, переводя преобразователь в момент прорыва в инверторный режим.

Для этой цели схема LC-фильтра была оборудована быстродействующей токовой защитой на трансформаторах постоянного тока, установленных в цепи подключающих тиратронов. При достижении тока уставки 300 а эта защита переводит преобразователь в инверторный режим.

Расчёт токов и напряжений в схеме при аварийном процессе и последующая экспериментальная проверка показали, что при работе защиты ток тиратронов снижается до 2,2 ка, а максимальное напряжение на конденсаторной батарее не превосходит 5 кв.

Защита от обратных зажигания тиратронов (9,13) выполнена с помощью двух комплектов кремниевых диодов (8,14) – см. рис. 4, включенных последовательно с тиратронами LC-фильтра.

Основные результаты работ, на основе которых написана диссертация, состоят в следующем:

1. Исследованы аварийные режимы, возникающие при циклической работе преобразователя системы питания, на основе чего разработан принцип защиты преобразователя от режима однофазного опрокидывания инвертора с короткозамыкателем. Разработаны датчики однофазного и двухфазного срыва инвертора, а также импульсная максимальная токовая защита мостов вентильного преобразователя системы питания.

2. Изучен характер протекания электромагнитных процессов, возникающих при обратных зажиганиях и прорывах вентилей преобразователя, на основе чего созданы дистанционные системы индикации вентилей, в которых происходят обратные зажигания и пробои в прямом направлении.

3. Сконструирована система управления вентильным преобразователем системы питания для формирования циклов треугольной, треугольной с промежуточной площадкой и трапецидальной формой тока возбуждения электромагнита ускорителя.

4. Разработан новый принцип управления преобразователем системы питания при переходах из одного режима в другой, в случае использования которого фазы управляющих импульсов изменяются не скачкообразно, а плавно за определенные промежутки времени, что позволило осуществить динамическую разгрузку валов электромашинных агрегатов системы питания и скомпенсировать недостаточную мощность межмостовых уравнительных реакторов.

Специально созданный пик-генератор позволил осуществить сложные режимы с двумя площадками тока и стабилизацией поля в этих режимах с точностью $\pm 1,0$ э относительно заданного уровня интеграторными датчиками поля.

5. По предложенной методике расчёта определены параметры основных элементов системы подавления пульсаций. Разработан проект и создана система подавления пульсаций в выпрямленном напряжении преобразователя системы питания электромагнита ускорителя. Получен расчётный коэффициент подавления основной и более высоких гармонических составляющих выпрямленного напряжения преобразователя (для первой гармоники с частотой 500 гц он равен 100).

6. Разработан принцип защиты подключающего LC-фильтра системы подавления пульсаций, и создана эффективная система защит.

Л и т е р а т у р а

1. А.А. Смирнов, Л.Н. Беляев, Н.И. Павлов, В.Г. Глушенко, И.А. Курсков. Авторское свидетельство № 261581 от 4 августа 1966 года.
2. А.А. Смирнов. Препринт ОИЯИ, 9-4308, Дубна, 1969.
3. А.А. Смирнов, Д.П. Калмыков, А.З. Дорошенко, Л.Н. Беляев. Сообщение ОИЯИ, Дубна, 1969.
4. А.А. Смирнов, Д.П. Калмыков, Л.Н. Беляев. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 9-16 октября 1968 года, том. 1, стр. 245-247.
5. А.А. Смирнов, А.З. Дорошенко, Д.П. Калмыков, Л.Н. Беляев. Сообщение ОИЯИ, 13-4242, Дубна, 1969.
6. А.А. Смирнов, А.З. Дорошенко, Д.П. Калмыков, Л.Н. Беляев. ПТЭ №1, 165-167 (1970).
7. А.А. Смирнов, Н.И. Павлов, Л.Н. Беляев. Сообщение ОИЯИ 9-4358, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

10 июля 1970 года.

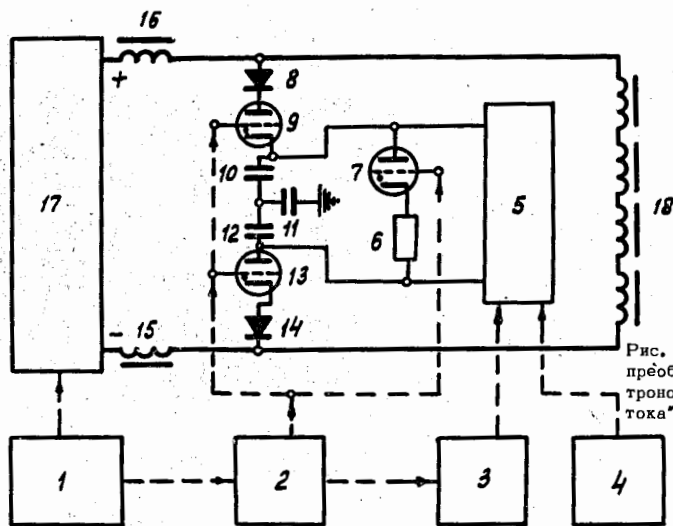


Рис. 4. Схема LC-фильтра системы подавления пульсаций магнитного поля дубненского протонного синхротрона. 1 - схема управления преобразователя, 2 - блок формирования импульсов поджигания, 3 - бланкирующее устройство, 4 - блок стабилизации подзарядного выпрямителя, 5 - подзарядный выпрямитель, 6 - сопротивление, 7, 8, 13 - тиратроны, 8, 14 - диоды, 10, 11, 12 - конденсаторная батарея, 15, 16 - фильтровая индуктивность, 17 - система питания электромагнита ускорителя, 18 - электромагнит ускорителя.

Рис. 5. Осциллограммы выпрямленного напряжения преобразователя (выход LC-фильтра) и тока тиратронов при работе фильтра в режиме "площадки тока" ($\psi = 0$).

