

Задачи повышения надежности мощных линаков – драйверов ЭЛЯУ

Д.А. Лякин, А.М. Козодаев, Н.В. Лазарев, А.М. Раскопин, В.С. Скачков
ГНЦ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия
liakin@vitep5.itep.ru

Применение мощных ускорителей на высокие энергии в электроядерных установках особенно остро ставит проблему надежности получения ускоренного пучка в течение всего запланированного времени. В докладе обсуждаются возможные способы повышения надежности работы сильноточных линейных ускорителей протонов и их подсистем, развивается анализ возможности безотказного ускорения в тракте с большим количеством независимых по ВЧ-питанию 1-5 зазорных секций при энергиях от десятков МэВ и выше.

Введение

Исследования по возможности создания электроядерных установок на базе ускорителей заряженных частиц проводятся практически всеми странами с развитой ядерной энергетикой. В рамках этих исследований разработаны проекты и сооружаются узлы линейных ускорителей протонов на энергию 0,6 -1,7 ГэВ со средним током пучка до 100 мА, что на два порядка превышает сегодняшний уровень. В порядке убывания мощности пучка на выходе из ускорителя их список выглядит следующим образом: АРТ, TRASCO, EA, TRISPAL, KOMAC, ESS, SNS, NSP (+JHP) [1]. Наиболее продвинутыми, вероятно, могут считаться проекты АРТ(LANL) и SNS (ORNL, ANL, BNL, LANL, LBNL).

В объединенном предложении российских ускорительных центров ИТЭФ, МРТИ, ИФВЭ и ИЯИ рассматривается линейный ускоритель с мощностью пучка 30 МВт. Современные технологии позволяют считать сооружение подобных ускорителей возможным, однако существует ряд физических и технологических задач, решение которых еще предстоит найти. Среди них – вопрос обеспечения высокой надежности линаков-драйверов.

1. Традиционные пути повышения надежности работы ускорителя

Существует несколько традиционных приемов обеспечения длительной непрерывной работы установок. Наиболее очевидными из них могут считаться эксплуатация в щадящем режиме, резервирование наиболее ответственных узлов, а также использование высоконадежных процессов, технологий и узлов [2].

Облегченный (на 20-40 %) режим работы элементов в значительной степени увеличивает срок службы оборудования, повышая надежность всей установки и снижая стоимость эксплуатационных расходов ценой некоторого увеличения капитальных затрат.

Резервирование широко применяется в системах, не допускающих простоев на время ремонта вышедшего из строя оборудования. При этом на время ремонта задействуются дополнительные узлы, которые до использования их в основной системе могут поддерживаться в «холодном», «горячем» или работающем состояниях. В зависимости от исходного состояния длительность процесса ввода резерва может достигать нескольких часов, причем «горячее» 100% резервирование, например в ВЧ-системе, может уменьшить относительное время простоев до значений, меньших 0,5%, оставляя, тем не менее, вероятность кратковременных пропаданий пучка на выходе ускорителя.

2. Повышение надежности при использовании возможностей ускоряющего тракта

Логическим развитием идеи резервирования является использование возможностей ускоряющего канала с большим количеством однозазорных секций, имеющих независимые тракты ВЧ-питания [2]. В этом случае, при выходе из строя отдельных трактов ВЧ-питания или самих секций, тем не менее, возможно бесперебойное ускорение с сохранением приемлемого качества выходного пучка. Возможность бесперебойного ускорения определяется относительно малым набором энергии в каждой независимой секции, так что отключение по той или иной причине любой из них вызывает лишь возникновение продольных колебаний ускоряемого пучка на малое время быстрого автоматического перераспределения фаз и амплитуд ВЧ-поля в оставшихся работоспособными секциями.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ.

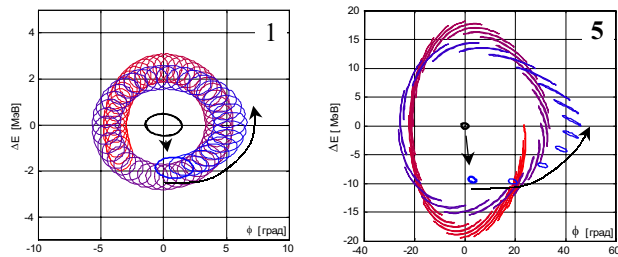


Рис. 1. Результат отключения одного (1) и пяти (5) последовательно ускоряющих зазоров.

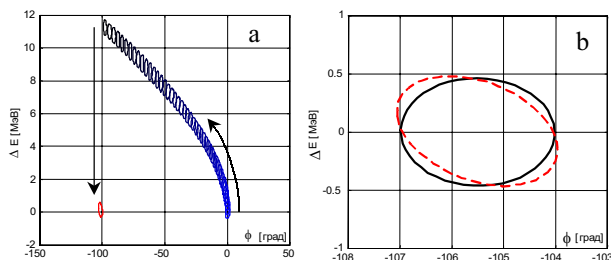


Рис. 2. Фазовые характеристики пучка при отказе одной 5-зоровой секции и компенсирующем перераспределении амплитуд и фаз ускоряющего поля в работающих секциях:

- a – набор энергии частицами на секциях, расположенных до отказавшей,
- b – сравнение невозмущенного и скорректированного (штрихи) пучка.

Немаловажным фактором больших проектов является стоимость. С этой точки зрения, увеличение количества мощных ВЧ-каналов (при одновременном уменьшении их мощности) удорожает установку. В экономически компромиссном варианте могут быть использованы секции более чем с одним ускоряющим зазором. Для примера, на рис.1 отражено влияние возмущения частиц в сверхпроводящем ускорителе при энергии 600 МэВ (в виде отказа одной секции с 1 или 5 зазорами) на фазовые характеристики пучка при его последующем движении без компенсирующего перераспределения фаз и амплитуд ускоряющего ВЧ-поля в работающих секциях [3]. Видно, что после прохождения частиц через отказавшую секцию наблюдается скачок представляющего пучок контура и дальнейшая его трансформация в направлении стрелок. Однако немедленной потери частиц не возникает. Результаты моделирования показывают, что при реальных на сегодня величинах набора энергии на зазор в сверхпроводящих структурах 5-зоровые секции являются граничным вариантом, при котором еще возможно построение безотказной системы.

Перестройкой параметров ускоряющих полей работающих секций можно добиться того, что результатом отказа будет лишь незначительное увеличение эффективного продольного эмиттанта пучка, что практически не скажется на качестве ускорения в связи с большой величиной запаса по устойчивости ускорения в машинах такого класса (рис. 2).

3. Требования к системе управления многорезонаторным ускорителем

Совершенно очевидно, что требования к автоматизированной системе управления таким ускорителем должны существенно отличаться от требований к традиционным системам управления. Естественно, система управления, как любая система ускорителя, вносит свой вклад в суммарное количество отказов в работе установки. Однако вероятность отказа элементов системы управления отдельного ВЧ-канала значительно меньше, чем, скажем, силовых элементов электропитания или ВЧ-возбуждения этого канала. Возможность отказа центральной системы управления также не исключена, однако правильный выбор ее структурной схемы, предусматривающей делегирование многих функций локальным системам, позволит ускорителю работать без участия центральной системы в течение промежутка времени, достаточного для ее замены на резервную.

Система управления должна выполнять свои функции при отказе любого из ее узлов. К этому можно стремиться, во-первых, соответствующим образом выбирая конфигурацию машины, в которой отказ локальной системы управления был бы эквивалентен отказу единичного тракта, что является допустимым с точки зрения безостановочности процесса ускорения. Во-вторых, локальные системы управления единичными трактами могут обеспечивать достаточно качественное поддержание процесса ускорения на время возможного отключения или занятости центрального процессора. В-третьих, локальные системы, обладая лишь неполной информацией о состоянии ускорителя, способны оперативно и самостоятельно отработать отказ одного из ускоряющих каналов, что позволяет добиться компромисса между быстродействием системы и степенью участия центрального процессора в общем управлении.

4. Выбор структурной схемы и моделирование системы управления

Одной из задач системы управления многорезонаторного ускорителя является наискорейшее восстановление качественных параметров пучка после отказа одного из ВЧ-каналов или секции. Существование независимой настройки для каждого из каналов обеспечивает, с одной стороны, возможность продолжения работы ускорителя при ограниченном количестве отказов, с другой, – замедляет процесс настройки системы в целом.

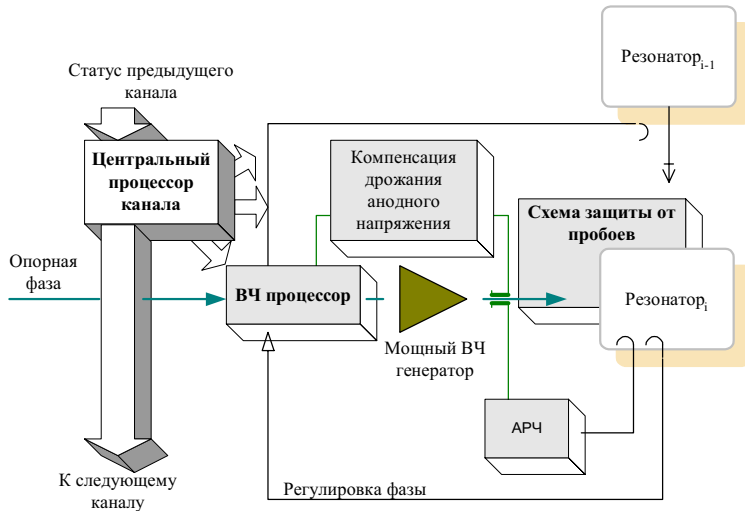


Рис.3. Общая схема построения системы управления одной секции ускорителя.

торной структуры сохранять работоспособность при отказе любой из секции от центрального компьютера не требуется «мгновенная» реакция на отказ. Центральный процессор системы управления будет иметь вполне разумное время на перерасчет и выбор оптимального распределения амплитуд и фаз ВЧ-поля в дееспособных секциях в то время, как ускоритель будет работать в режиме приближенном к кондиционному.

Для сокращения времени перехода с одной «кондиционной» настройки ускорителя на другую можно предусмотреть механизм оперативного *автоматического* изменения настройки системы, обеспечиваемый локальными контроллерами управления на основе доступной им информации без участия центральной системы. Укрупненно схема управления одним каналом может выглядеть так, как это показано на рис. 3. Ограниченность используемой контроллером информации является решающим условием оперативности и надежности данной структурной схемы. Не вдаваясь в подробности реализации мощного ВЧ-тракта, можно сказать, что локальная система управления одним каналом использует как традиционный набор сигналов, несущих информацию об амплитуде и фазе поля, так и сведения о параметрах пучка и состоянии каналов соседних ускоряющих секций.

Следует отметить, что в отличие от существующих систем, использующих опережающую информацию о параметрах пучка для предварительной коррекции режима с целью поддержания заданных параметров (фазы и амплитуды ВЧ-поля), рассматриваемая система может использовать полученную информацию для коррекции самих параметров ускоряющего поля.

Таким образом, фаза и амплитуда ВЧ-поля уже не являются константами, а становятся функциями параметров пучка и, кроме того, могут зависеть от состояния предыдущей секции ускорения.

Очевидно, что попытка построить централизованную систему управления потребовала бы привлечения весьма дорогостоящих ресурсов, включающих в себя высокопроизводительные линии передачи данных и очень мощный центральный компьютер.

Более рациональной видится распределенная топология управления, состоящая из множества значительно более простых, не требующих экстремальных ресурсов локальных контроллеров. Управление в такой конфигурации осуществляется заданием ограниченного количества параметров, величина которых после расчета центральным компьютером передается локальным системам управления для поддержания на фиксированном уровне.

Благодаря свойству многорезона-

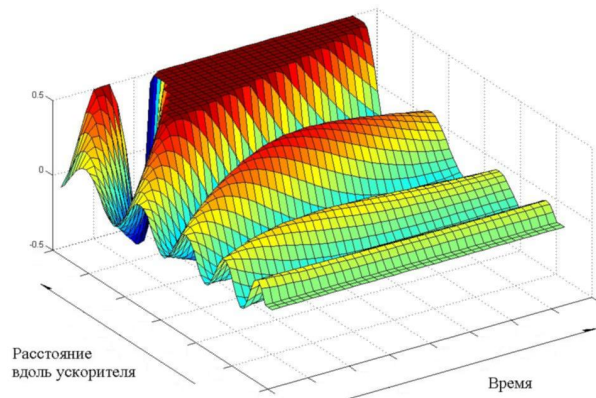


Рис. 4. Пример неустойчивого поведения системы управления при отказе одной секции ускорителя.

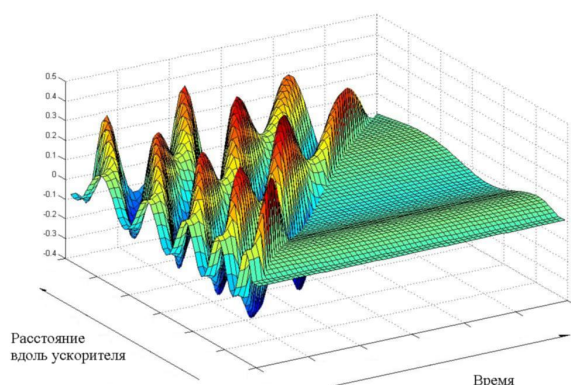


Рис. 5. Конвейерная обработка возмущения синхронной фазы.

MATLAB. Данная программа позволяет, задавая различные алгоритмы, изучать поведение сложной саморегулирующейся системы. Для линейной системы (стандартный ПИД регулятор в качестве контроллера секции) так и не удалось получить приемлемого решения. Из рис. 4, который показывает поведение такой системы при одной из наиболее «удачных» настроек, видно, что на отдельных участках происходит раскачка амплитуды продольных фазовых колебаний вплоть до потери устойчивого ускорения.

Тем не менее, при использовании более широкого класса функций (не только линейных) были найдены схемы и режимы, позволяющие осуществить переход режима ускорения в новое «кондиционное» состояние, сохраняя качество прохождения пучка. В частности, на рис. 5 показан переходный процесс при использовании «конвейерного» алгоритма обработки отказа одного из ускоряющих каналов. Последовательная обработка возмущения каналами – «конвейеризация» в значительной степени стабилизировала процесс, исключив срыв ускорения в течение перестройки и значительно уменьшив фазовые колебания после нее.

Заключение

Практическая целесообразность сооружения мощных линейных ускорителей для включения их в состав электроядерных установок в существенной степени зависит от ожидаемого относительного времени доступности пучка, что напрямую зависит от надежности наиболее важных и сложных систем, к которым, в первую очередь, относится система ВЧ-питания основной части ускорителя. Проведенные авторами исследования подтверждают возможность получения безостановочного ускорения в тракте, построенном из одно- или малозазорных резонаторов с независимыми трактами ВЧ-питания. На выходе ускорителя могут обеспечиваться кондиционные параметры пучка, несмотря на отказ трактов ВЧ-питания отдельных секций, вывод их в ремонт и возвращение в строй, а также невзирая на некоторые виды неисправностей самих ускоряющих секций.

Литература

- [1] Н.В. Лазарев, А.М. Козодаев. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и ЭЛЯУ. - Доклад на 17-м совещании по ускорителям заряж. частиц. - Протвино, 2000.
- [2] А.М. Kozodaev et al. Reliability Increase Ways for High Power Linacs - ADS Drivers. EPAC-2000, pp. 942-944.
- [3] А.М. Kozodaev et al. Simulation of Proton Beam Behavior in High Energy Linac with Few-Gaps Resonators at Failure of One or Some of Them. - EPAC-2000, pp. 830-832.

Проведенное моделирование поведения самонастраивающихся систем управления многорезонаторным ускорителем для различных конфигураций цепей обратной связи по пучку показало, что использование абсолютно идентичных каналов управления не обеспечивает нахождения ускоряемого пучка в пределах сепаратрисы на всем протяжении переходного периода к новому «кондиционному» режиму ускорения.

Рис. 4 дает представление о характере поведения одной из таких систем. График показывает временную зависимость распределения отклонения фазы центра тяжести ускоряемого пучка от «синхронной» фазы вдоль ускорителя. Данные были получены с помощью специально созданной программы моделирования, написанной на C++. Визуализация выполнена средствами пакета