

А.С. Чепурнов, И.В. Грибов, К.А. Гудков, А.В. Шумаков, В.И. Шведунов
(НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

РОЛЬ ЛОКАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Functions and architectural solutions of local feedback loops (LFL) in control systems of large experimental installations are discussed and illustrated by the example of Race Track Microtron (RTM) LINAC control system. Local feedback control systems of the RF field amplitude and phase in accelerating section (AS) and self-frequency of the AS were designed as analog LFL, supporting safe and stable long-time operation of the accelerator and quality of the beam necessary for the experiments.

In order to minimize time of ineffective operation of the RTM, LFL design cycle have been developed. Optimal parameters of the regulators as a results of a computer simulation of the feedback systems have been found. An accuracy of the simulation permits a relative stability and a dumping ratio of real systems in the operating mode of the RTM. Future system improvement on the basis of digital signal processors are discussed.

Введение

В настоящее время в НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова ведется создание ускорителя электронов нового типа — разрезной микротрон непрерывного действия (РМ). Ускоритель предназначен для создания пучков электронов высокого качества: энергетическое разрешение $10 E^{-3} — 10 E^{-4}$, максимальная энергия — 175 МэВ, эмиттанс — 0,05 мм² мрад, максимальный ток — 100 мкА [1]. Успешно функционирует инжектор разрезного микротрона с выходной энергией 6 МэВ. Рециркулятор находится в стадии создания [2]. Системе управления ускорителем в целом посвящена отдельная статья [3]. В данной статье рассматривается подсистема нижнего, приближенного к аппаратуре ускорителя, уровня, предназначенная для управления и контроля системой СВЧ-питания ускоряющих секций ускорителя. Вместе с системой электронной оптики система СВЧ-питания играет важную роль в достижении высокого качества пучка, необходимого как для нормального функционирования ускорителя, так и для проведения прецизионных ядерно-физических экспериментов.

Системы с обратной связью, применяемые в разрезном микротроне

Преимущества управления с обратной связью хорошо известны [5,6]:

- повышение точности стабилизируемых параметров. В замкнутой системе разница между требуемым и измеряемым откликом системы может быть приближена к нулю;
- повышение нечувствительности к изменениям в компонентах системы. Поведение системы в целом остается прежним, несмотря на изменения в отдельных компонентах;
- уменьшение влияния внешних возмущений;
- "улучшение" поведения системы в соответствии с требованиями по проектированию.

В аппаратуре ускорителя системы с обратной связью представлены достаточно широко и выполняют следующие функции: регулирование непосредственно параметров пучка; регулирование параметров, обеспечивающих функционирование ускорителя в целом. Системы первого типа обеспечивают пространственную юстировку и проводку пучка с помощью электронно-оптических устройств; подстройку энергии пучка путем управления СВЧ-параметрами секции: фаза и амплитуда СВЧ-поля, собственная частота секции, опорная частота задающего клистрона. Системы второго типа обеспечивают стабилизацию тепловых параметров, стабилизацию питающих напряжений (в том числе высоковольтного питания пушки и клистронов). Рассмотрим более подробно систему управления СВЧ-трактом ускоряющей секции разрезного микротрона.

Система управления СВЧ-трактом ускоряющей секции выполняет следующие основные функции: обеспечивает процедуру ввода мощности; реализует аппаратные блокировки в аварийных ситуациях; управляет элементами СВЧ-тракта при ручном управлении; обеспечивает работу СВЧ-тракта в автоматическом режиме; стабилизирует основные СВЧ-параметры. Первые четыре функции в данной работе на рассматриваются. Некоторые из них, а также работа СВЧ-тракта в различных режимах рассмотрены в [1,2,4]. В данной статье рассматривается работа системы управления СВЧ-трактом в режиме автоматического регулирования основных СВЧ-параметров. В этом режиме происходит стабилизация амплитуды поля секции, фазы поля секции (разность фаз между опорным СВЧ-сигналом и полем секции), собственная частота секции, температура охлаждающей воды секции. Режим включения и выключения стабилизации происходит по команде от верхнего уровня системы автоматического управления ускорителем (САУ), установка для каждой системы задается через отдельный канал ЦАП оператором. Управляющие параметры и регулируемые параметры контролируются через АЦП.

Принципы, лежащие в основе разработанных локальных систем управления. Основной задачей было создание работоспособного ускорителя как инструмента для ядерной физики, а не изучение ускорителя с точки зрения управления. Вся исследовательская работа велась в объеме, необходимом для решения строго конкретной на данном этапе задачи. Конечной целью было обеспечить условия для запуска ускорителя, по возможности широко использовать существующие методы, разработки и методики для сокращения общего времени разработки.

Необходимо отметить следующее. В связи с тем, что работы по созданию ускорителя такого типа являются пионерскими в нашей стране, возможности в привлечении инженерных сил со стороны были ограничены, поскольку формирование технического задания на ту или иную подсистему происходило параллельно с ее созданием. Особое внимание уделялось надежности и безопасности функционирования всех систем. Все работы проводились в условиях жесткой экономии материальных средств.

Особенности системы с точки зрения управления. Рассмотрим особенности СВЧ-тракта как объекта управления. Основная особенность, усложнившая процесс создания системы, заключается в том, что объект в целом может функционировать только при наличии достаточно сложной управляющей системы, которая является его неотъемлемой частью. Создание стендов и эмуляторов было признано целесообразным только на начальном этапе проектирования в силу специфики СВЧ-измерений и особенностей всего объекта. Для исследовательских целей в систему управления были заложены средства, избыточные в номинальном режиме работы, но необходимые на стадии настройки и исследования ускорителя. Были предусмотрены дополнительные измерительные каналы и дополнительные каналы управления, легко настраиваемые пользователем и используемые в исследовательских целях.

Система управления использовалась для работ по идентификации объекта. Поэтому модификация устройства управлений происходила параллельно с уточнением данных о внутренней структуре и свойствах объекта с точки зрения управления и регулирования. Объект управления вместе с устройством управления рассматривался и анализировался как единая динамическая система, в которой доступны для изменения параметры устройства управления.

Система управления проектировалась достаточно гибкой для того, чтобы максимально учесть возможную модификацию СВЧ-оборудования в процессе создания. Поскольку аналогов данному ускорителю не существует, цели проектирования отдельных систем формулировались в процессе создания ускорителя. В момент начала разработки описываемых систем не было известно, какой физический объект будет выступать в роли объекта управления и с какой точностью требуется стабилизировать параметры. Все подсистемы ускорителя развивались параллельно и были готовы в разные сроки.

Рассмотрим технические особенности системы. Системы должны обеспечивать стабилизацию параметров с относительной ошибкой $1.0E-3$ в широком диапазоне частот. Системы должны обеспечивать долговременную стабильность в течение нескольких месяцев непрерывной работы. Для системы стабилизации амплитуды и фазы требуемый диапазон частот определяется добротностью секции и составляет около $0-1,5$ МГц. Для системы стабилизации собственной частоты и температуры охлаждающей воды диапазон частот лежит в НЧ области и не превышает $0-0,5$ Гц. Проектирование регуляторов для этих систем было затруднено в связи с наличием транспортного запаздывания (например, при определенных условиях и представлении объекта в виде модели второго порядка с запаздыванием при $T_1 = 5$ с и $T_2 = 12$ с $T_{\text{зап}} = 5 - 15$ с в зависимости от расхода воды).

Особенностью системы является то, что большую трудность представляет прогнозирование источников возникновения возмущений и их локализация. Тщательные исследования показали, что кроме ожидаемых "стандартных" возмущений с частотами, пропорциональными промышленной частоте, проникающими из систем мощного электропитания, присутствуют возмущения на частотах до 600 кГц, возникающие спонтанно, имеющие импульсный характер и связанные с различными режимами работы СВЧ-элементов. Особое внимание было уделено исследованию долговременных трендов в течение дней и недель непрерывной работы с включенными и выключенными системами стабилизации. Дополнительной "неприятной" особенностью системы является внутренняя связь, существующая между системами. Так, система стабилизации фазы в процессе отработки возмущающих воздействий по фазе создает возмущение по амплитуде и аналогично для системы стабилизации амплитуды. Эта особенность связана с конструкцией элементов управления в таких системах аттенуатора на рпн-диодах и фазовращателя [4].

К особенностям системы можно отнести и временную нестабильность параметров, которая связана с двумя факторами, специфическими для СВЧ-устройств: естественное "старение" элементов в процессе эксплуатации и замена вышедших из строя элементов. "Старение" элементов приводит к медленному дрейфу параметров (например, уменьшение коэффициента усиления клистрона, старение управляющих ламп системы регулирования высоковольтного питания и т.п.), что в некоторый момент может привести к скачкообразному изменению других параметров. Поскольку нет опыта длительной эксплуатации применяемого в нашем ускорителе СВЧ-тракта, нет и возможности прогнозировать эти процессы. В то же время желательно как можно дольше обеспечивать заданный характер и параметры функционирования системы в целом. При выходе из строя какого-либо элемента или при плановой замене (клистроны

имеют ограниченный ресурс), возникает проблема подстройки системы, так как параметры объекта могут отличаться в 2—10 раз.

Перечисленные выше особенности системы, выявленные в процессе ее проектирования, определили архитектурные решения и конструкцию созданной системы управления СВЧ-тракта.

Архитектурные решения при проектировании систем с обратной связью. Аппаратура управления ускорителем насыщена устройствами управления с обратной связью. В зависимости от характеристики объекта управления целесообразно применять различные архитектурные решения. Можно выделить следующие основные архитектурные решения:

- 1) аналоговые системы, автономные;
- 2) аналоговые системы, управляемые центральной САУ;
- 3) цифровые системы — "программные";
- 4) "разумные" цифровые локальные системы на цифровых сигнальных процессорах.

Автономные аналоговые системы применяются для стабилизации параметров, значения которых не требуют подстройки и изменяются крайне редко. Эти системы могут быть не связаны совсем или быть слабо связаны с системой управления. Конструктивно они представляют собой аналоговые блоки, в которых реализованы П, ПИ или ПИД законы регулирования. Управление и контроль производятся вручную с помощью ручек и переключателей. Требуют периодического контроля и настройки. Принципы разработки хорошо известны. Можно использовать стандартные, серийно выпускаемые для теплотехнических целей изделия. Примеры использования в РМ: система стабилизации высоковольтного питания пушки, система стабилизации температуры в контуре охлаждения.

Аналоговые системы, управляемые центральной АСУ, наиболее широко применяются в настоящее время для управления СВЧ-трактами ускоряющих секций и стабилизации основных СВЧ-параметров: амплитуды СВЧ-поля секции, разности фаз между опорным сигналом и полем секции, собственной частоты секции. Системы могут работать при соответствующей схмотехнике и настройке в различных полосах частот от 0,1 Гц до 2,0 МГц. Алгоритмы управления и регулирования жестко определяются реализацией и не могут изменяться. Применяется ПИ или ПИД закон управления. Параметры алгоритма могут изменяться в узком диапазоне вручную. Требуют тщательной индивидуальной настройки. Аппаратная надежность и помехозащищенность невысокая в связи с большим количеством дискретных элементов и кабельных соединений. С САУ верхнего уровня связываются с использованием АЦП, ЦАП и битовых передатчиков. САУ верхнего уровня задает уставки, включает и выключает обратную связь, а также контролирует такие параметры, как управляющее воздействие и стабилизируемый сигнал.

Несмотря на указанные выше недостатки, разработка таких систем достаточно проста, привычна и дешева. Примеры проектирования широко описаны даже в учебной литературе, поэтому на начальном этапе, когда необходимо было обеспечить физическое функционирование систем, применялись аналоговые системы стабилизации, управляемые от верхнего уровня САУ.

Цифровые системы "программные" — после того, как были запущены НЧ системы для стабилизации температуры и собственной частоты, реализованные в виде аналоговых блоков, управляемых с помощью верхнего уровня САУ, и были исследованы характеристики объекта управления, логичным решением было заменить аналоговые системы на цифровые, поскольку вся инфраструктура (измерение параметров управления и контролируемых сигналов осуществляется с помощью 12-разрядных АЦП) уже присутствовала. Аналоговые устройства стабилизации, разработанные ранее, использовались для нормали-

зации сигналов контроля и управления, обратная связь замыкалась "цифровым" способом на уровне прикладного программного обеспечения [7].

Таким образом, алгоритмы стабилизации были реализованы в виде процессов реального времени в рамках программного обеспечения станций управления САУ. В настоящее время "программные" регуляторы применяются для подстройки некритичных по времени или медленно меняющихся процессов. Реализованы следующие системы: стабилизации опорной частоты (точность работы определяется точностью цифрового частотомера — $10E^{-8}$, температуры охлаждающей воды каждой ускоряющей секции (точность $0,04^{\circ}C$), поиск центра тяжести пучка при проводке через линейный ускоритель. Основное ограничение применения — увеличение загрузки САУ, малое быстродействие. Преимущества — гибкость алгоритмов управления, высокая надежность и помехозащищенность.

"Разумные" цифровые локальные системы, построенные на базе процессоров цифровой обработки сигналов (ПЦОС), являются современным архитектурным решением при разработке систем стабилизации и управления сложными объектами. В настоящее время в области цифрового управления ПЦОС находят все большее применение. Основные области применения в области управления — военные приложения, системы слежения, управление энергетическими установками и автомобильными двигателями, позиционирование головок в винчестерах, робототехника, сервоприводы и т. д. [8]. К основным преимуществам применения ПЦОС для цифрового управления можно отнести следующие [8,9]:

- программная реализация сложных законов управления;
- высокая точность и быстродействие в реализации алгоритмов управления;
- простота моделирования и предсказания результата до аппаратной реализации;
- быстрое изменение параметров управления без изменения аппаратной части;
- повышенная защищенность от внешних возмущающих факторов и отсутствие дрейфа параметров, присущих аналоговым схемам.

Основные недостатки применения ПЦОС: высокая сложность разработки таких устройств и достаточно большие начальные финансовые затраты на приобретение инструментальных средств для разработки системы. Такие регуляторы обладают относительно невысоким быстродействием. При повышении быстродействия резко начинает расти стоимость (за счет быстродействующих АЦП и ЦАП) и падает "интеллектуальность" системы за счет сокращения допустимой длины управляющей программы.

В настоящее время в рамках проекта по модернизации системы управления РМ проводятся работы по разработке и созданию локальных систем управления СВЧ-трактом ускоряющей секции на основе ПЦОС. В устройстве будет использоваться ПЦОС с "математикой с фиксированной точкой" — TMS320C25 [10]. Эти системы предназначены для замены систем второго и частично третьего типов. Связь с верхним уровнем САУ осуществляется с использованием стандарта MIL-STD 1553B [11]. Предполагается, что применение подобных систем позволит повысить:

- надежность системы в целом за счет снижения количества элементов, уменьшения кабельных соединений и увеличения помехозащищенности,
 - точность регулирования за счет применения современных алгоритмов управления и гибкости систем регулирования;
- позволит снизить:
- время настройки каждой системы и перенастройки,

– загрузку верхнего уровня САУ, что даст возможность реализовать при тех же вычислительных мощностях более удобный и надежный интерфейс с оператором, увеличить "интеллектуальность" системы управления,
– общую стоимость системы в результате уменьшения общего количества применяемых элементов и кабельных соединений.

В качестве базового комплекта инструментальных средств используется программно-аппаратный стенд на базе персонального компьютера. В состав стенда входит отладочная плата с ПЦОС TMS 320C25 DSP 25 U, работающая под управлением отладочной программы "KGU", и разработанные нами устройства—12-разрядные АЦП и ЦАП, подключенные к ПЦОС через локальную шину платы. Плата и программа являются серийным продуктом фирмы "Инструментальные системы" (Москва). Стенд такого типа, в состав которого входят ПЦОС с системой загрузки и отладки программ, АЦП и ЦАП дает возможность провести практические эксперименты по прямому цифровому управлению на модели объекта.

По техническому заданию регулятор должен работать в полосе частот 0—1,5 МГц. ПЦОС типа TMS 320C 25 может обеспечить частоту дискретизации при управлении по ПИД закону не выше 170 кГц при тактовой частоте 40 МГц [8]. Для того, чтобы обеспечить требуемую по техническому заданию полосу пропускания, предполагается использовать дополнительные, управляемые от ПЦОС аналоговые петли стабилизации на быстродействующих операционных усилителях, работающие в полосе частот выше максимально возможной для прямого цифрового регулирования. Параметры аналоговой петли стабилизации (постоянная времени, коэффициент усиления, включение—выключение) могут изменяться по команде от ПЦОС через многоканальный 8-разрядный ЦАП.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Alimov A.S. e.a.* MOSCOW CW RACE-TRACK MICROTRON : Preprint INR MSU. — 93 — 1993. 9/301.
2. *Alimov A.S. e.a.* // Nuclear Instr. & Meth. in Phys. Res. 1993. A326. P. 391—398.
3. *Chepurnov A.S., Gribov I.V., Morosov S. Yu. e.a.* // Proc. Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control System (Tsukuba, Japan, KEK, 11—15 Nov. 1991.) Tsukuba, 1993. P. 140—142.
4. *Chepurnov A.S., Gribov I.V., Morozov S.Yu., Shumakov A.V.* // Proc. Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (Tsukuba, Japan, KEK, 11—15 Nov., 1991.) Tsukuba, 1993. P.424—426.
5. *Miron D.B.* Design of feedback control systems, Harcour Brace Jovanovich. San Diego, 1989. 435. P.
6. *Hostetter G.H., Savant C.J., Stefani R.T.* Design of feedback control systems // New York, 1989. 671. P.
7. *Грибов И.В., Морозов С.Ю., Чепурнов А.С., Шумаков А.В.* // Труды XII Всес. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Москва, 3—5 октября 1990. Дубна, 1992. Т.2. С.46—49.
8. Digital Signal Control Applications with the TMS320. // Ed. by Irtan Ahmed, Texas Instruments, 1991.
9. Digital Signal Processing Application Seminar, Analog Devices, 1992.
10. *Kun-Shan Lin e. a.* // Proc. of the IEEE, 1987. Vol.75, N9. P. 1143—1159.
11. *Хвоц С.Т., Дорошенко В.В., Горовой В.В.* Организация последовательных мультиплексных каналов систем автоматического управления Л., 1989. 271с.