

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

A-471

9-88-43

УДК 621.384.634.25

АЛЕКСЕЕВ

Николай Николаевич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
И МЕТОДИК ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА ИТЭФ**

**Специальность: 01.04.20 - физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1988

Работа выполнена в Институте теоретической и экспериментальной физики.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук
Гольдин Лев Лазаревич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Мозян Игорь Васильевич (НИИЭФА, Ленинград);

доктор технических наук Федотов Олег Петрович (ИТЭФ, Москва).

Ведущая организация - Институт физики высоких энергий (г.Протвино).

Защита состоится "___" _____ 1988 г.

в ___ час. ___ мин. на заседании специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь специализированного совета Д-047.01.03 при ОИЯИ доктор физ.-мат. наук

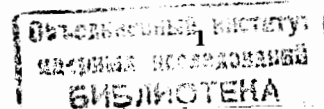
/Ю.А.Батузов/

Общая характеристика работ

Актуальность работ. Ускорители на высокие энергии являются сложными, уникальными и дорогостоящими электрофизическими установками, поэтому вопросы улучшения эксплуатационных характеристик таких установок и повышения их эффективности оказываются в центре внимания во всех ускорительных центрах. Одно из важнейших направлений совершенствования ускорителей связано с применением средств автоматизированного управления, создаваемых на основе мини-ЭВМ и микропроцессоров. Использование ЭВМ в качестве контролирующих и управляющих элементов позволяет на качественно новом уровне конструировать подсистемы ускорителей, решать проблему оптимального управления ускорителями, создавать многофункциональные ускорительно-накопительные комплексы, включающие в себя несколько совместно работающих установок разного типа (протонных и электронных синхротронов, линейных ускорителей, накопителей, коллайдеров), параллельно проводить несколько физических экспериментов на частицах разного типа при разных энергиях и т.д. Таким образом, разработка средств и методов автоматизированного управления является одной из наиболее актуальных задач, решение которой во многом определяет прогресс ускорительной техники.

Состояние вопроса. В настоящее время в мире накоплен определенный опыт создания автоматизированных систем управления крупными ускорительными установками, однако общепринятой методики построения таких систем пока не существует.

Одна из главных причин, осложняющих построения такой методики, вытекает из особенностей ускорителей как объектов управления. Все крупные ускорители уникальны. Их назначение и состав оборудования на каждом ускорителе свои. Ускорители непрерывно совершенствуются. Вследствие этого математические модели ускорителей устаревают раньше, чем их удается разработать. Вместе с тем, ни один крупный ускоритель



не может эффективно использоваться без системы автоматизированного управления, использующей современные ЭВМ.

Наблюдаемый из года в год прогресс в области автоматизации ускорителей является следствием постоянно улучшаемой базы микроэлектроники, роста производительности, расширения объема памяти и уменьшения стоимости выпускаемых промышленностью ЭВМ. Расширение возможностей АСУ происходит за счет усложнения структуры, объединения в единой системе все большего числа процессоров.

Усложнение структуры АСУ обуславливает проблемы, связанные с разработкой программного обеспечения (ПО). Одно из главных требований к ПО АСУ ускорителем – возможность оперативно вносить изменения в алгоритмы управления и контроля. Постоянная модификация режимов и состава оборудования ускорителя приводит к необходимости оперативно программировать новые задачи. Для сложной многофункциональной АСУ такое требование можно обеспечить только при помощи специализированных средств программирования прикладных задач, реализованных на ЭВМ АСУ, удовлетворяющих специфике ускорителя как объекта автоматизированного управления и не требующих от пользователей профессиональной подготовки в качестве программистов. Такие средства программирования в настоящее время отсутствуют. Наиболее перспективными из проведенных разработок по данной проблеме представляются мощные интерактивные системы, применяемые на ускорителях **CERN, DESY, KEK**.

Проблема повышения эффективности ускорителей на основе средств автоматизированного управления связана с разработкой новых технологических приемов построения подсистем ускорителя, а также оптимального управления сложной многопараметрической системой в условиях постоянного дрейфа оптимального режима. Данные вопросы постоянно обсуждаются в научной литературе, однако еще не нашли комплексного решения.

Цель работы заключалась в улучшении эксплуатационных характеристик протонного синхротрона У-10 путем модернизации его систем на основе средств автоматизированного управления. Для достижения постав-

ленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение особенностей синхротрона как объекта автоматизированного управления. Анализ мирового опыта автоматизированного управления ускорителями.

2. Разработка для многопроцессорной АСУ У-10 комплекса специализированных средств программирования задач автоматизированного управления и контроля параметров синхротрона.

3. Разработка – на основе средств автоматизированного управления – эффективных методик транспортировки пучка по ионопроводу, коррекции магнитного поля синхротрона, автоматической оптимизации режимов подсистем синхротрона, автоматизированного контроля оборудования синхротрона.

Научная новизна

1. Предложены оригинальные алгоритмы построения комплекса программных средств для многопроцессорной АСУ синхротрона, позволяющих эффективно использовать аппаратуру АСУ для повышения эксплуатационных характеристик действующей установки.

2. Предложена новая методика многопараметрической оптимизации режимов систем синхротрона на основе сочетания методов детерминированной настройки и поисковых процедур, реализуемых в псевдосепарабельном пространстве варьируемых параметров, связанных линейным преобразованием с физическими параметрами оптимизируемых систем.

3. Впервые создана высокоэффективная автоматизированная система индивидуальной коррекции поля магнитных блоков синхротрона.

Практическая ценность

1. Разработан комплекс программных средств АСУ У-10, включающий быстрый и гибкую операционную систему, мощную интерпретирующую систему, а также пакеты прикладных программ, обеспечившие кардинальное улучшение эксплуатационных характеристик синхротрона У-10.

2. На основе средств автоматизированного управления решены следующие практические задачи:

- а) реализована эффективная система коррекции магнитного поля синхротрона У-10;
 - б) создана система автоматизированной оптимизации канала транспортировки пучка от инжектора до синхротрона;
 - в) обеспечен автоматизированный контроль многочисленных параметров систем синхротрона;
 - г) налажено автоматизированное измерение параметров пучка на всех этапах ускорения;
 - д) создана система автоматической многопараметрической оптимизации режима работы синхротрона; показана эффективность такой системы.
3. Созданная структура программного обеспечения АСУ У-10 позволяет с небольшими затратами на программирование наращивать мощность автоматизированной системы путем расширения сети интерфейсов, а также подключения к системе новых процессоров.

Использование результатов работы. Разработанное системное ПО применяется на синхротроне У-10 с 1979 г., пакеты прикладных программ доукомплектовывались по мере введения в эксплуатацию аппаратных средств. В 1980 и 1982 гг. соответственно I-я и II-я очереди АСУ У-10 приняты Государственной комиссией в промышленную эксплуатацию. За счет внедрения средств АСУ средняя интенсивность синхротрона У-10 увеличилась более, чем в 3 раза, и превысила 10^{12} протонов за цикл.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на VII, VIII, IX, X Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, II Международной конференции по ускорителям высоких энергий, III Всесоюзном семинаре по обработке физической информации, а также опубликованы в препринтах ИТЭФ.

Публикации. По результатам и положениям диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ.

Объем работы. Диссертация изложена на 112 страницах машинописного текста, иллюстрируется 52 рисунками и таблицами на 34 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 68 наименований на 7 страницах.

Автор защищает:

1. Структуру комплекса программных средств, позволяющих эффективно использовать и развивать многопроцессорную автоматизированную систему управления синхротроном.

2. Системное ПО для многопроцессорной АСУ синхротроном, включающее:

а) интерактивную интерпретирующую систему, обеспечивающую непосредственное взаимодействие оператора с автоматизированной системой управления синхротроном, а также программирование прикладных задач на языке высокого уровня;

б) операционную систему, поддерживающую функции интерпретирующей системы, а также обеспечивающую выполнение прикладных программ в режиме разделения времени и в реальном времени работы синхротрона.

3. Комплект пакетов прикладных программ, обеспечивающих эффективное решение ряда задач автоматизированного управления синхротроном, включая:

- а) транспортировку пучка по ионопроводу,
- б) коррекцию магнитного поля,
- в) оптимизацию режима инжекции и захвата.

Содержание работы

В первой главе диссертации приводится анализ функций автоматизированного управления и контроля параметров протонного синхротрона (ПС), вытекающих из конструктивных особенностей установки и режимов ее эксплуатации.

К существенным особенностям ПС как объекта автоматизированного управления относится наличие большого количества сложных и разнотипных систем, связанных между собой многочисленными функциональными связями; пространственная разнесенность оборудования; многообразие режимов работы; постоянный дрейф оптимального режима; непрерывное совершенствование ускорителя, проводимое параллельно с работой на физический эксперимент. Нахождение и поддержание оптимального режима ра-

боты ПС является одной из задач, которая должна постоянно решаться автоматизированной системой управления. При большом числе (несколько десятков и даже сотен) оптимизируемых параметров задача оптимизации становится громоздкой и традиционными методами решается слишком медленно. Если же система управления не обеспечивает достаточно высокую скорость оптимизации, ускоритель работает с низкой эффективностью.

В кратком обзоре работ, опубликованных по вопросам автоматизации ускорителей, рассматриваются основные тенденции развития автоматизированных систем управления в ведущих физических центрах Советского Союза, Европы, США и Японии, анализируются недостатки и достоинства применявшихся решений основных проблем, которые были учтены при разработке АСУ У-10.

Вторая глава посвящена вопросам организации ПО АСУ ПС.

При выборе способа организации ПО основная цель заключалась в достижении максимальной эффективности использования аппаратных средств АСУ при минимальных затратах на программирование. Для АСУ У-10 был разработан специальный язык программирования высокого уровня, реализованный в форме интерпретатора, создана индексированная файловая структура, эффективно использующая информационное пространство дисков и рассчитанная на хранение сотен прикладных программ, разработана специальная операционная система, обеспечивающая многопрограммный режим работы процессоров ЭВМ в реальном масштабе времени работы ускорителя, а также все необходимые процедуры ввода/вывода, включая межмашинный обмен информацией. Объем системного программного обеспечения ограничивается размером ОЗУ ЭВМ ЕС1010 (64 Кбайт). Применение на системном уровне оверлейных процедур оказалось нецелесообразным из-за значительного замедления выполнения операций.

Прикладное программное обеспечение составляется на языке интерпретатора, размещается на внешних носителях информации и составляет основной объем ПО АСУ. В существующей конфигурации АСУ У-10 библиотека прикладных программ размещается на мини-дисках двух ЭВМ ЕС1010 (800x4

Кбайт) и содержит около восьмисот файлов. Около 30% объема библиотеки используется для обеспечения эксплуатации ускорителя, приблизительно такой же объем занимают программы, предназначенные для проводимых на ускорителе теоретических и экспериментальных исследований, в остальных 40% объема библиотеки содержатся тестовые программы, справочная информация, незавершенные программы и др.

В третьей главе рассматриваются вопросы организации и практического применения прикладного ПО многопроцессорной АСУ. Проведенная систематизация функций АСУ позволила сформировать классы задач автоматизированного управления и контроля параметров ускорителя и определить алгоритмы решения основных проблем. Показано, каким образом на основе реализованных специализированных средств программирования на уровне пользователя решаются проблемы:

систематизации прикладного ПО, распределенного в многопроцессорной системе по внешним носителям информации разных ЭВМ;

организации баз данных, содержащих всю необходимую информацию об объекте управления;

оптимизации режимов систем ускорителя;

ручного централизованного управления распределенными системами ускорителя;

регулирования динамических процессов в реальном масштабе времени работы установки;

непрерывного наблюдения за состоянием ускорителя;

оперативного контроля оборудования;

исследований, связанных с изучением установки, отработкой новых режимов работы, тестированием аппаратуры и т.д.

В четвертой главе рассматривается трудоемкая задача оптимизации условий инжекции и захвата пучка в режим ускорения и ее решение на У-10 при помощи средств автоматизированного управления. По разработанной методике оптимизируется около 200 параметров систем ускорителя, определяющих оптимальность условий инжекции и захвата. Особенности

разработанной методики является сочетание методов детерминированной настройки и поисковых процедур, реализуемых в псевдосепарабельном пространстве варьируемых параметров, связанных линейным преобразованием с физическими параметрами оптимизируемых систем.

Из опыта эксплуатации У-10 известно, что в результате применения детерминированных методов оптимизации интенсивность ускоренного пучка оказывается на уровне 0,4-0,6 от максимального значения, однако при этом удается локализовать окрестность абсолютного экстремума целевой функции - интенсивности ускоренного пучка и тем самым существенно ограничить область пространства регулируемых параметров, в которой на последующих этапах оптимизации применяются методы экстремального поиска.

На синхротроне задачу экстремального поиска оптимального режима из-за большой размерности пространства настраиваемых параметров и сложной поверхности целевой функции не удается свести к выбору наиболее эффективного алгоритма поиска. Поиск экстремума на сложных поверхностях с многомерными хребтами и оврагами сопряжен с трудностями и требует применения специальных методов. Однако восхождение вдоль хребта любым методом неизбежно связано со значительными затратами времени, поэтому наилучший способ сократить время на поиск экстремума состоит в том, чтобы устранить хребты везде, где это возможно.

Многие хребты в окрестности экстремума целевой функции удается устранить линейным преобразованием координат

$$\bar{X}_1 = L \cdot \bar{X} \quad (I)$$

Расчет матрицы преобразования L проводится либо на основе априорной информации, либо при помощи экспериментальных данных. Например, для устранения хребтов используется преобразование токов коррекции в амплитуды гармоник равновесной орбиты, в локальные отклонения равновесной орбиты или в параметры резонансов. Устранение всех хребтов в окрестности экстремума приводит целевую функцию к сепарабельному виду

$$Q(\bar{X}) = \sum f_i (X_i - X_i^*) \quad (2)$$

где f_i - положительно определенные функции с максимумами в начале координат.

Сепарабельная поверхность вида (2) удобна тем, что многопараметрическую оптимизацию удается свести к последовательному по каждой из координат применению надежных методов однопараметрического поиска.

На практике не удается преобразовать пространство поиска таким образом, чтобы целевая функция была сепарабельна по всем оптимизируемым параметрам. Поэтому стратегия оптимизации, применяемая на У-10, ориентируется на представление целевой функции в более общем виде

$$Q(\bar{X}) = \prod_k \sum_i Y_{ki} (X_{ki} - X_{ki}^*) \quad (3)$$

где Y_{ki} - положительно определенные функции с максимумами в начале координат, определенные на непересекающихся подмножествах координат.

Положительно определенными мультипликативными составляющими целевой функции являются значения некоторых измеряемых величин, используемых в качестве промежуточных критериев оптимизации для отдельных групп параметров. В частности, параметры ионопровода могут оптимизироваться по току циркулирующего пучка; постоянноточные цепи коррекции магнитного поля - по интенсивности пучка, захваченного в режим ускорения; динамическая коррекция магнитного поля - по потерям частиц при ускорении.

Т.о. поиск экстремума целевой функции во всем пространстве управляемых параметров удается свести к последовательному применению методов экстремального поиска по промежуточным критериям и непересекающимся группам из небольшого числа параметров.

В пятой главе диссертации приводятся основные результаты, полученные от внедрения средств автоматизированного управления и контроля параметров синхротрона У-10.

Созданная АСУ У-10 включает в себя две ЭВМ ЕС1010, объединенных на уровне межпроцессорной связи в единый управляющий комплекс; разветвленную сеть интерфейсного оборудования (около 50 интерфейсных каркасов, распределенных по управляемым и контролируемым системам синхротрона); средства взаимодействия оператора с системой и представления информации (цветные и монохромные полнографические дисплеи, устройства централизованного управления типа "ручка", функциональные кнопки); несколько сотен управляемых от ЭВМ исполнительных устройств и одушебных модулей, непосредственно обеспечивающих выполнение функций автоматизированного управления и контроля параметров синхротрона У-10.

На основе автоматизированных средств диагностики пучка были проведены детальные исследования по динамике частиц в синхротроне У-10, выявлены и устранены существенные отклонения реальных характеристик установки от расчетных значений.

Созданная на У-10 разветвленная сеть интерфейсов АСУ, а также эффективные средства программирования позволили использовать в системах ускорителя простые в производстве исполнительные устройства, управляемые от ЭВМ и не имеющие приводов ручного управления (источники тока, функциональные генераторы, таймеры, регуляторы и т.п.). На новой элементной базе были модернизированы и соответственно переведены на управление от ЭВМ системы ускорителя, требующие частой перестройки и оптимизации, связанной с длительными и трудоемкими процедурами регулирования большого числа параметров (система коррекции магнитного поля, система синхронизации, система электропитания магнитной оптики ионопровода).

Разработанные методики многопараметрической оптимизации режимов систем ускорителя позволяют поддерживать интенсивность У-10 на уровне, близком к максимальному, в условиях значительного влияния на оптимальный режим изменяющихся во времени внешних параметров.

При помощи автоматизированного контроля оборудования У-10 удалось

существенно снизить затраты времени на выявление возникающих в процессе эксплуатации ускорителя неисправностей, а также на тестирование и исследование динамических характеристик аппаратуры во всем диапазоне рабочих режимов.

Основные результаты работы

1. Проведен анализ особенностей синхротрона как объекта автоматизированного управления. Сформулированы требования к системе автоматизированного управления синхротроном.

2. Создана автоматизированная система управления и контроля параметров синхротрона У-10.

3. Создан комплекс эффективных средств программирования прикладных задач управления и контроля параметров синхротрона, включающий интерактивную интерпретирующую систему специализированного языка программирования высокого уровня и многопрограммную операционную систему, обеспечивающую выполнение программ в реальном масштабе времени работы установки.

4. Проведена систематизация функций АСУ ускорителем, выделены классы задач автоматизированного управления и контроля параметров ускорителя, предложены алгоритмы решения основных проблем.

5. Разработана методика многопараметрической оптимизации режимов систем синхротрона. По разработанной методике оптимизируются более 200 параметров различных систем синхротрона У-10.

6. Налажена автоматизированная оптимизация режима оптических элементов ионопровода. В режиме текущей эксплуатации У-10 обеспечивается транспортировка пучка от инжектора до синхротрона без потерь, а также согласование эмиттанса пучка с аксептансом ускорителя.

7. На основе средств автоматизации реализована эффективная многопараметрическая система коррекции магнитного поля синхротрона У-10.

8. Налажен автоматизированный контроль параметров систем синхротрона У-10 и диагностика пучка на всех этапах ускорения. Объем информации, вырабатываемой в каждом цикле ускорения аппаратурой автоматизированного контроля оборудования У-10 и диагностики пучка, составляет

30 кбайт. Обработанная информация представляется в наглядной форме на экранах цветных и монохромных полнографических дисплеев.

9. Модернизация синхротрона У-10 на основе средств автоматизации позволила увеличить среднюю интенсивность У-10 более, чем в три раза (интенсивность У-10, усредненная за 1978 г. составляла 3.3×10^{11} прот/цикл, за 1986 г. - 12.3×10^{11} прот/цикл, максимальная интенсивность достигала 15×10^{11} прот/цикл.

10. На основе созданной структуры аппаратных и программных средств АСУ У-10 будет продолжена модернизация синхротрона У-10 с целью дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик установки.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Алексеев Н.Н., Еобченко Б.М., Веселов М.А., Гольдин Л.Л., Заводов В.П., Мулкин Л.А., Оносовский К.К., Рябцев А.С. Автоматизированная система контроля и управления на протонном синхротроне ИТЭФ. Труды УП Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, с. 302, Дубна, 1981.

2. Алексеев Н.Н., Заводов В.П., Рябцев А.С. Организация автоматизированного управления протонным синхротроном ИТЭФ. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, с. 264, Дубна, 1985.

3. Алексеев Н.Н., Большаков А.Е., Веселов М.А., Гольдин Л.Л., Горячев Ю.М., Заводов В.П., Златов Ю.М., Зудинов Ю.Б., Лебедев П.И., Круглов Б.И., Мулкин Л.А., Николаев В.И., Оносовский К.К., Плигин Ю.С., Щеголев В.А. Обзор состояния дел на протонном синхротроне ИТЭФ. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, с. 301, Дубна, 1983.

4. Alexeev N.N., Veselov M.A., Goldin L.L., Zavadov V.P., Reabscev A.S. Experiments on the automatic optimization of injection conditions at the ITEP proton synchrotron. 11th International Conference on High-Energy Accelerators, p.433, Basel.Boston.Stuttgart,1980.

5. Алексеев Н.Н., Заводов В.П. Структура аппаратных и програм-

мных средств АСУ протонного синхротрона ИТЭФ. Обработка физической информации. Тезисы докладов III Всесоюзного семинара по обработке физической информации. ЦНИИатоминформ, Ереван, 1985.

6. Алексеев Н.Н. Интерпретационная система НОДАЛ для ЭВМ ЕС1010. Препринт ИТЭФ № 118, 1979.

7. Алексеев Н.Н. Интерпретационная система НОДАЛ для ЭВМ ЕС1010. Препринт ИТЭФ № 137, 1981.

8. Алексеев Н.Н. Программное обеспечение межмашинной связи ЭВМ ЕС1010. Препринт ИТЭФ, № 117, 1983.

9. Алексеев Н.Н., Заводов В.П., Рябцев А.С. Автоматизированная система динамической коррекции магнитного поля протонного синхротрона ИТЭФ. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, с. 216, Дубна, 1983.

10. Алексеев Н.Н., Большаков А.Е., Заводов В.П., Рябцев А.С., Скачков С.В. Система коррекции вертикального положения орбиты на протонном синхротроне ИТЭФ. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 2, с. 43, Дубна, 1985.

11. Алексеев Н.Н., Пушкин Е.В., Рябцев А.С., Ковшов А.Л. Автоматизированная система индивидуальной коррекции поля магнитных блоков синхротрона У-10. Препринт ИТЭФ, № 168, 1986.

12. Алексеев Н.Н., Заводов В.П. Транспортировка пучка по ионопроводу. Препринт ИТЭФ, № 81, 1981.

13. Алексеев Н.Н., Пушкин Е.В., Рябцев А.С. Автоматизированная система индивидуальной коррекции поля магнитных блоков синхротрона У-10. X Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов. Дубна, 1986, ОИИ, Р9-86-62, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 января 1988 года.