

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМИ УСКОРИТЕЛЯМИ

А. И. Исаков, Г. Н. Соловьев

В настоящее время все линейные ускорители (ЛУ) можно подразделить на две группы. Одна группа предназначена для проведения физических исследований. Вторая группа широко применяется в народном хозяйстве. В ряде отечественных работ /1/ подробно рассмотрена проблема применения электронных вычислительных машин для управления ЛУ именно второй группы, причем авторы ориентировались лишь на использование аналоговых вычислительных машин.

Анализ состояния и развития ускорителей первой группы обнаруживает тенденцию к использованию для целей управления прежде всего цифровых электронных вычислительных машин. Современные ЛУ с постоянным стремлением к повышению энергии и токов ускоряемых частиц являются исключительно сложными многопараметрическими системами. Управление такими установками становится невозможным без автоматического сбора и обработки информации с помощью ЦВМ.

Целесообразность использования ЦВМ для управления ЛУ следует и из других соображений. Большинство ЛУ первой группы предназначено для проведения физических исследований, где обработка полученной информации осуществляется на ЦВМ.

Система управления ЛУ с помощью ЦВМ в основном служит для выполнения трех задач: автоматический контроль состояния систем ускорителя, автомати-

ческий запуск подсистем и системы ускорителя в целом, автоматическая обработка на ЦВМ входной информации при выведении системы на соответствующий режим.

Решение первых двух задач с помощью ЦВМ выполняется в соответствии с алгоритмами, которые определяют последовательность и периодичность опроса, осуществляют сравнение контролируемых параметров с заранее введенными установками, а также устанавливают заданную последовательность запуска отдельных секций системы. Третья задача очень специфична — здесь, в отличие от первых двух, происходит преобразование информации. Для реализации этого преобразования на ЦВМ необходима аналитическая связь между входными и выходными параметрами (математическое описание).

Основой получения таких математических описаний является теория ускорителей элементарных частиц. Здесь как правило используется язык дифференциальных уравнений. Признавая абсолютную правомочность такого подхода, считая его основным, нельзя не отметить и некоторых его недостатков. С ростом мощностей и усложнением ЛУ получение аналитических зависимостей в некоторых случаях становится невозможным, или же они получаются настолько сложными, что время их решения на ЦВМ становится чрезмерно большим. При теоретическом подходе приходится делать определенные допущения, в результате полученные математические описания становятся не адекватными объекту управления.

В работе /1/ и других обращено внимание на использование в качестве основы для получения математических моделей электронных ЛУ современной теории экстремального планирования эксперимента /2/. С появлением сверхмощных ЛУ и созданием систем управления лишь на основе ЦВМ, актуальность применения теории экстремального планирования эксперимента лишь возрастает. При этом получение математической модели заключается в нахождении уравнения поверхности

отклика. В качестве отклика выступает выходной параметр как некоторая функция входных регулируемых параметров. Получение указанных моделей или уравнений предусматривает выполнение следующих двух этапов.

Первый этап. С помощью ограниченного количества экспериментов, выполненных на действующем объекте, определяется направление движения к оптимальной точке (в стационарную область) на поверхности отклика. Эта задача решается с помощью разработанных методов восхождения (методы градиента, метод крутого восхождения) по поверхности отклика. После определения оптимальной точки или близкой к ней проводится серия экспериментов на действующем объекте в окрестностях этой точки. Объем эксперимента, область его проведения строго определены так называемыми планами (полные факторные эксперименты  $2^n$  и  $3^n$ , центральное композиционное планирование эксперимента  $2^n + 2 \cdot n + n_0$ , где  $n$  - число управляемых параметров).

Второй этап. Ввод экспериментальных данных в ЦВМ и их обработка по специальным алгоритмам с целью получения постоянных коэффициентов уравнения поверхности отклика ( $A_1, A_2, A_3, A_{12} \dots$ ). Это уравнение (модель, аппроксимирующий полином) в общем виде, для трех переменных, записывается следующим образом

$$y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_{12} X_1 X_2 + A_{13} X_1 X_3 + A_{23} X_2 X_3 + \\ + A_{11} X_1^2 + A_{22} X_2^2 + A_{33} X_3^2.$$

В зависимости от принятой схемы планирования эксперимента мы можем получить полином первой степени, полином первой степени с членами, определяющими парные взаимодействия, и полином второго порядка. В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию планов, обеспечивающих получение моделей в виде полиномов третьей и четвертой степени.

После получения модели необходимо убедиться, что полученный полином правильно (с допустимой точностью) отражает связи между входными и выходными параметрами.

Одним из исключительно важных качеств описываемой методики является возможность по математической модели получить относительно простую систему дифференциальных уравнений, определяющих оптимальный режим объекта управления /3/.

Рассмотренная методика получения математических моделей была положена в основу работ по исследованию вопросов построения системы управления ЛУ электронов с энергией 50 Мэв на цифровой вычислительной машине УРАЛ-11 лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ СССР. Для управления ЛУ необходимо было прежде всего создать соответствующее программное обеспечение на машине УРАЛ-11. Оно было создано силами сотрудников кафедры "Электронные вычислительные машины" МИФИ.

Программа (№ 1) для восхождения в стационарную область по методу градиента совместно с подпрограммой выдачи результатов и массивом исходных данных и констант занимает 750 ячеек ОЗУ. На ее выполнение для  $n = 3$  требуется 15 сек на 1 шаг. В среднем выполняется 5+8 шагов, на которые требуется 1,5 + 2 мин машинного времени. После каждого шага проводится снятие экспериментальных данных на объекте управления. Характер эксперимента определяется результатами машинных вычислений.

Программа (№ 2) обработки экспериментальных данных в соответствии с планом 2<sup>а</sup> занимает 95 ячеек. Для  $n = 3$  требуется 15 сек, а для  $n = 8$  - порядка 10 мин машинного времени.

Программа (№ 3) обработки экспериментальных данных в соответствии с планом 3<sup>а</sup> содержит 400 команд. Время ее выполнения по сравнению с предыдущей увеличивается в 1,5 + 2 раза.

Программа (№ 4) обработки по центральному композиционному планированию эксперимента содержит

600 команд. Время ее выполнения также зависит от  $n$ , и для  $n = 3$  требуется 20 сек.

Программа (№ 5) решения порождающего полинома (модели объекта) и систем уравнений, описывающих оптимальный режим устройства для заданных выходных параметров. В основу решения положен метод Гаусса, основанный на исключении переменных из уравнений. Программа, исходные и промежуточные данные занимают 1400 ячеек ОЗУ. Время ее выполнения зависит от числа параметров, по которым производится оптимизация, что определяет порядок системы уравнений. Для системы, состоящей из 7 дифференциальных уравнений, при тройном просчете требуется на решение 16 сек машинного времени.

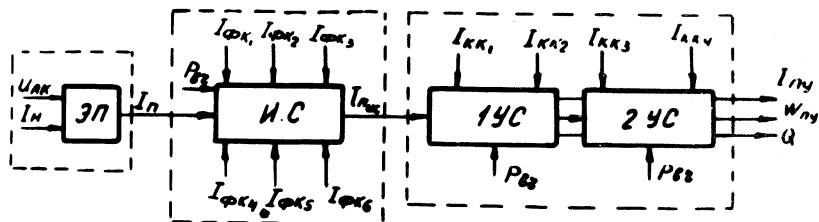
В целом для указанного программного обеспечения нужно около 3000 ячеек ОЗУ и 2000 ячеек для необходимых стандартных подпрограмм машины УРАЛ-11.

Необходимо отметить, что приведенный перечень программ — это тот минимум, с которым можно лишь приступить к исследованию вопросов управления ЛУ с помощью ЦВМ. Для реальной системы управления ЛУ этот минимум должен быть дополнен. Необходимо, чтобы программы (2,3,4) обеспечивали проверку адекватности полученных моделей объекту управления. Дополнение и развитие должно предусматривать создание программ обработки экспериментальных данных с целью получения коэффициентов для моделей 3-го и 4-го порядка. Необходимо разработка тестовой программы. Эта тестовая программа должна следить за соответствием полученных моделей объекту управления и в случае нарушения этого соответствия передавать управление на получение новой модели. Ряд вопросов развития программного обеспечения АСУ еще не ясен, и потребуются некоторое время, чтобы сформулировать соответствующие четкие задания.

С помощью рассмотренных программ было получено несколько моделей электронной пушки линейного ускорителя ФИАН при различных значениях напряжения на промежуточном электроде. Сравнение результатов, по-

лученных на модели, с реальными характеристиками системы показало, что расхождение не превышало  $2 + 3\%$  во всем диапазоне изменения переменных.

Рассматриваемая методика нашла исключительно эффективное применение в вопросах наладки системы — при юстировке фокусирующих катушек инжекторной секции. Этот вопрос подробно рассмотрен в отдельной статье /4/.



$$\begin{cases} I_{п} = f(U_{ак}, I_{н}) & U_{п} = const. \\ I_{п_{УС}} = f(I_{п}; I_{фк1}, I_{фк2}, I_{фк3}, I_{фк4}, I_{фк5}, I_{фк6}; P_{в2}) \\ I_{пучка} = f(I_{п_{УС}}; I_{кк1}, I_{кк2}, I_{кк3}, I_{кк4}; P_{в2}) \end{cases}$$

Р и с. 1. Схема ЛУ как объекта управления.

Первые и весьма удачные применения ЦВМ на основе экстремального планирования эксперимента в частных вопросах управления ЛУ определили перспективу проведения работ в этом направлении. Ускоритель как объект управления представляется в виде последовательно соединенных секций в соответствии с рис. 1. Для каждой секции предполагается получить модели в соответствии с выходными и входными параметрами, также указанными на этом рисунке. При получении указанных моделей можно будет приступить к основной цели — экспериментальной отработке оптимальных ре-

жимов работы отдельных секций и ускорителя в целом в режиме АСУ.

Поступила в редакцию  
6 апреля 1971 г.

### Л и т е р а т у р а

1. В. Д. Чалый. Основные направления применения аналоговых вычислительных машин для управления ЛУЭ в процессе его эксплуатации. Сб. статей "Исследование применений цифровых и аналоговых вычислительных машин в ядерной физике и технике", вып.1, Атомиздат, М., 1967 г.
2. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., "Наука", 1965 г.
3. В. Д. Чалый. Постановка задачи оптимизации ЛУЭ и построение системы уравнений, обеспечивающей его оптимальный режим. Сб. статей "Применение цифровых и аналоговых вычислительных машин в ядерной физике и технике", выпуск II, Атомиздат, М., 1968 г.
4. Г. Б. Вербицкий и др. Юстировка фокусирующих катушек инжекторной секции линейного ускорителя электронов методом крутого восхождения. Препринт ФИАН, 1971 г. (в печати).