

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

K 28

P9-88-675

**А.А.Касьянов*, В.Б.Кутнер, В.М.Рыбин*,
А.М.Сухов, Ю.П.Третьяков, В.Г.Субботин,
Б.В.Фефилов**

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ПОДСИСТЕМА
ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ
ПУЧКА ЦИКЛОТРОНА У-400
ПОСРЕДСТВОМ ВАРИАЦИИ РЕЖИМА
ИОННОГО ИСТОЧНИКА**

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

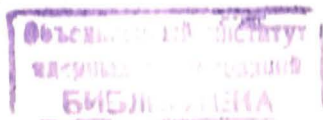
*Московский инженерно-физический институт

1988

В работах /1-3/ описана микропроцессорная подсистема управления (МППУ) дуговым источником многозарядных ионов (ИМЗИ)^{4,5/} циклотрона У-400, выполненная на базе аппаратуры КАМАК и интеллектуального контроллера крейта. Основной функцией МППУ являлось автоматическое зажигание дуги и получение заданных оператором значений параметров дугового разряда, мощности распыления рабочего вещества электрода и их последующая стабилизация. Более сложной и важной с точки зрения эффективности проведения физических экспериментов с пучками многозарядных ионов (МЗИ) представляется задача автоматического получения и поддержания заданного или максимально возможного тока пучка МЗИ при оптимальном режиме работы источника. Ионный источник - это одна из основных подсистем циклотрона, определяющая интенсивность пучка МЗИ и продолжительность непрерывного физического эксперимента. Зависимости тока ускоренного ионного пучка от режима работы источника достаточно изучены /4,6,7/. Ток МЗИ при фиксированных управляющих параметрах циклотрона можно рассматривать как нелинейную функцию пяти независимых входных параметров ИМЗИ: напряжения выпрямителя питания дуги $U_{вд}$, тока подогрева катода $I_{пк}$, положения иглы вентиля напуска вспомогательного газа x_Q , напряжения на распыляемом электроде U_p и положения распыляемого электрода x_p относительно стенки разрядной камеры.

Семейства характеристик, измеренных на внутреннем пучке циклотрона У-400 для тока пучка ионов $^{31}P^{4+}$, приведены на рис.1. Пунктиром показаны участки характеристик, где из-за недостатка вспомогательного газа в конце импульса дуга срывается. Для определения положений x_Q и x_p (в вольтах) использованы потенциометры.

Задача автоматического управления током пучка циклотрона с точки зрения получения максимального срока службы источника формулируется следующим образом: получить и поддерживать заданный ток пучка I_0 при ограничениях сверху на ток и напряжение дуги I_d, U_d и ток и напряжение на распыляемом электроде I_p, U_p . В ряде случаев заданного тока при заданных ограничениях $I_{до}, U_{до}, I_{ро}, U_{ро}$ достичь не удастся. Поэтому ставится задача достижения минимального отклонения тока пучка I от заданного. Критерий управления выглядит следующим образом: найти $\min |I(U_{вд}, I_{пк}, x_Q, U_p, x_p) - I_0|$ при ограничениях:



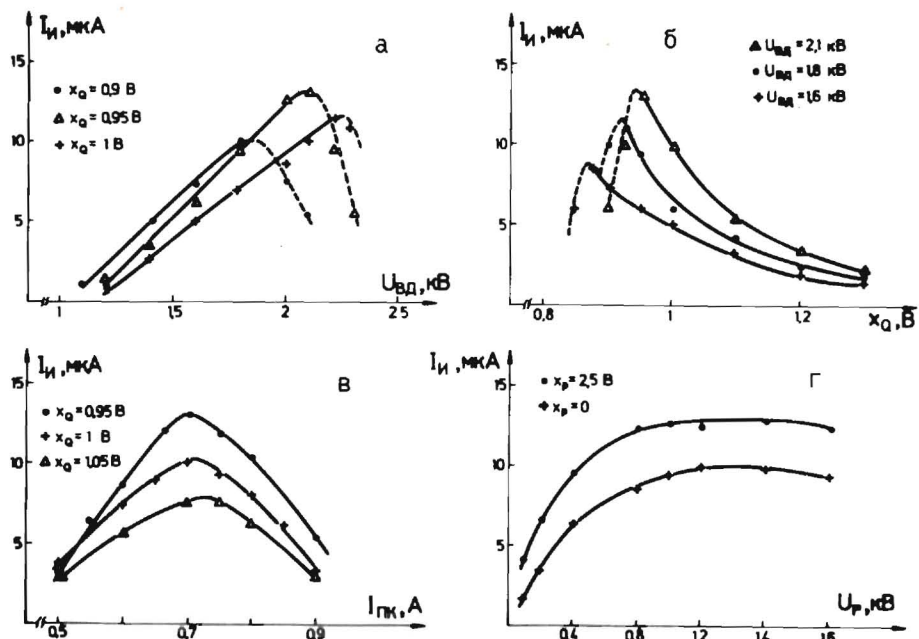


Рис. 1. Статические зависимости тока пучка $^{31}\text{P}^{4+}$ от управляющих параметров источника: а - от напряжения выпрямителя дуги $U_{вд}$ ($I_{пк} = 0,7 \text{ А}$; $U_p = 1,4 \text{ кВ}$; $x_p = 2,5 \text{ В}$); б - от положения иглы вентиля напуска газа x_0 ($I_{пк} = 0,7 \text{ А}$, $U_p = 1,4 \text{ кВ}$, $x_p = 2,5 \text{ В}$); в - от тока подогрева катода $I_{пк}$ ($U_{вд} = 2,1 \text{ кВ}$, $U_p = 1,4 \text{ кВ}$, $x_p = 2,5 \text{ В}$); г - от напряжения на распыляемом электроде U_p ($U_{вд} = 2,1 \text{ кВ}$, $I_{пк} = 0,7 \text{ А}$, $x_0 = 0,95 \text{ В}$).

$$\begin{cases} I_{д}(U_{вд}, I_{пк}, x_0, U_p, x_p) \leq I_{до}, \\ U_{д}(U_{вд}, I_{пк}, x_0, U_p, x_p) \leq U_{до}, \\ I_{р}(U_{вд}, I_{пк}, x_0, U_p, x_p) \leq I_{ро}, \\ U_p \leq U_{ро}. \end{cases}$$

Эта задача относится к классу задач экстремального управления статическим объектом с ограничениями. Функции ограничений также являются нелинейными. На эффективность решения задачи оказывают влияние такие факторы, как нестабильность дугового разряда, дрейф экстремума (со средней скоростью до 10% в час),

срывы дуги и пробои на распыляемом электроде источника, из-за которых функция отклика (ток пучка) претерпевает разрывы. Уход параметров режима циклотрона, в особенности амплитуды ускоряющего напряжения и тока электромагнита циклотрона, пробои с дуантов или отключения катушек и линз по тракту транспортировки пучка приводят к резкому уменьшению тока ускоренного пучка. В этом случае настройка на заданный ток пучка невозможна и должна быть прекращена.

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПОДСИСТЕМЫ И СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для решения задачи управления током пучка ускоренных ионов в состав аппаратуры МППУ, описанной в работе [1], введен канал измерения тока пучка. Ток измеряется непосредственно на мишени физика-экспериментатора с помощью интегрирующего ампервольтметра Ф-30 [8], который через соответствующий КАМАК-интерфейс подключен к микроЭВМ подсистемы. Диапазон измерения токов $0,001 \div 100 \text{ мкА}$.

Для экстремального управления током пучка с помощью микроЭВМ КМ-001 был разработан алгоритм, основанный на покомнатном методе поиска экстремума с проверкой условия выполнения ограничений и коррекцией области допустимых значений входных переменных.

Общий алгоритм автоматического получения заданного или максимально возможного тока пучка состоит в следующем:

1. Диалоговый ввод задания режима управления, который включает задание уставки тока пучка и значений ограничений на параметры дугового разряда, распыления рабочего вещества и диапазон входных переменных, погрешность настройки тока пучка ($\geq 1\%$), начальных значений параметров разряда и распыления, а также указание тех входных переменных, которые микроЭВМ разрешено варьировать при настройке.

2. Автоматическое зажигание дугового разряда и получение начальных значений параметров дуги, распыления и расхода газа [2].

3. Автоматический поиск заданного тока пучка МЗИ с соблюдением ограничений.

Структура программного обеспечения, реализующего алгоритм экстремального управления, представлена на рис.2. Программа "Монитор" управляет процессом вызова подпрограмм последовательного поиска экстремума по одной из пяти входных переменных. В ходе работы подпрограмм выполняются следующие операции: измерение и фильтрация тока пучка МЗИ и параметров режима ИМЗИ;

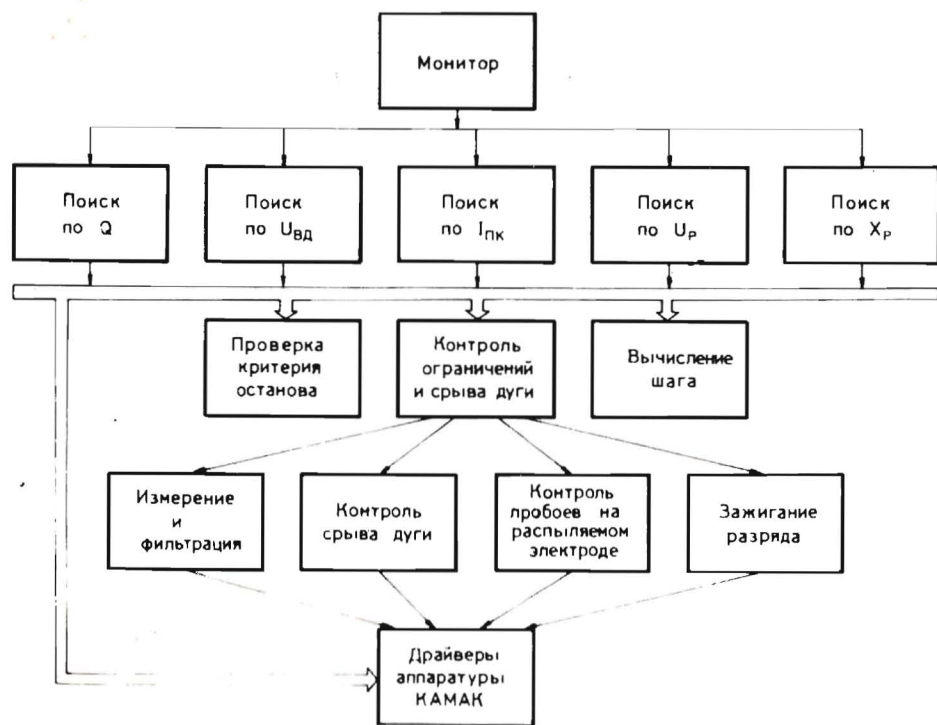


Рис.2. Структура программного обеспечения подсистемы.

контроль выполнения ограничений, срывов дуги и пробоев на распыляемом электроде; вычисление шага по соответствующей управляющей переменной; выдача управляющего воздействия через аппаратуру КАМАК^{1/}; проверка критерия останова.

Каждая из подпрограмм по координатному поиску на текущей итерации перед вычислением шага управления обращается к подпрограмме контроля срыва дугового разряда и соблюдения ограничений. Алгоритм ее работы (рис.3) состоит из следующих операций:

1. Проведение серии измерений тока пучка и параметров ИМЗИ, их фильтрация и усреднение.
2. Контроль срыва дугового разряда по следующим критериям: а) падение тока дуги до величины менее 0,1 А; б) возникновение колебаний тока и напряжения дуги с отклонением от среднего значения на величину более 30%. В случае фиксации срыва разряда запускается подпрограмма зажигания дуги, алгоритм работы которой описан в^{2/}, и производится коррекция огра-

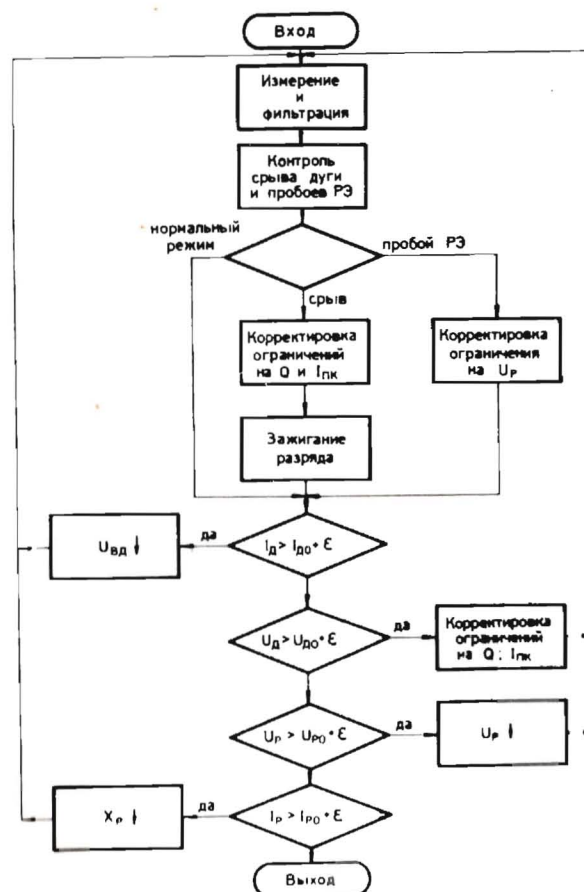


Рис.3. Алгоритм работы подпрограммы контроля ограничений и срыва дуги.

ничений снизу на расход газа и ток подогрева катода:

$$Q_{\min} = Q_1 + \epsilon_1,$$

$$I_{\text{пк min}} = I_{\text{пк1}} + \epsilon_2,$$

где $Q_1, I_{\text{пк1}}$ - величины расхода газа и тока подогрева катода на итерации, предшествующей срыву; ϵ_1, ϵ_2 - положительные константы, определяемые экспериментально (далее в тексте ϵ несет тот же смысл).

3. Фиксация однократных пробоев на распыляемом электроде, при которой следует снижение на 30% напряжения U_p с последующим его восстановлением. Если пробои

возникают непрерывно, микроЭВМ автоматически корректирует ограничение $U_{p \max} = U_{p1} - \epsilon$.

4. Проверка ограничений на ток и напряжения дуги. Если $I_d > I_{d0} + \epsilon$, то приведение I_d к норме ($I_d \leq I_{d0}$) производится путем снижения напряжения питания выпрямителя дуги. Если $U_d > U_{d0} + \epsilon$, то снижения напряжения разряда до допустимого значения $U_d = U_{d0}$ микроЭВМ добивается сначала увеличением тока подогрева до предела, определяемого зажиганием дуги между нитью накала и катодом^{2/}. При малом расходе газа увеличение тока подогрева часто не приводит к снижению U_d , тогда микроЭВМ делает шаг по расходу газа в сторону увеличения. При этом корректируются ограничения: $Q_{\min} = Q_1 + \epsilon, I_{\text{пк min}} = I_{\text{пк1}} + \epsilon$.

5. Проверка ограничений на параметры распыления. В случае, когда ток распыления $I_p > I_{p0} + \epsilon$, его коррекция производится за счет перемещения электрода от центра разрядной камеры.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ШАГА И КРИТЕРИЙ ОСТАНОВА

Для каждого управляющего параметра перед первой итерацией задается экспериментально определенное начальное значение шага Δx_0 . Далее на i -й итерации шаг вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta x_{i+1} = \Delta x_i, & \text{если } |I_i - I_0| < |I_{i-1} - I_0| \text{ и } (I_i - I_0) \cdot (I_{i-1} - I_0) > 0, \\ \Delta x_{i+1} = -\frac{\Delta x_i}{2}, & \text{если } |I_i - I_0| > |I_{i-1} - I_0| \text{ или } (I_i - I_0) \cdot (I_{i-1} - I_0) < 0. \end{cases}$$

Критерий останова покоординатного поиска по какой-либо входной переменной включает выполнение одного из условий:

а) $\frac{|I_i - I_0|}{I_0} < \delta$, где δ - относительная точность настройки

тока пучка, заданная оператором;

б) $\frac{|I_i - I_{i-1}|}{\max\{I_{i-1}, I_{\min}\}} \leq 0,01$, где I_{\min} выбрано равным 0,01 мкА;

в) $\Delta x_{i+1} = 0$;

г) шаг в выбранном направлении приводит к нарушению какого-либо ограничения;

д) управляющая переменная выходит за диапазон допустимых значений.

Полностью поиск завершается при выполнении условия "а", а также в случае, если после окончания очередного j -го цикла итераций по всем пяти координатам выполняется условие

$$\frac{|I_j - I_{j-1}|}{\max\{I_{j-1}, I_{\min}\}} \leq 0,01, \text{ где } I_j, I_{j-1} - \text{значение тока после за-}$$

вершений текущего и предыдущего циклов.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОПЕРАТОРОМ

Оперативное управление режимом работы МППУ осуществляется либо с клавиатуры дисплея, либо с пульта ручного управления^{1/}, что более удобно и предпочтительно для оператора. Пульт ручного управления включает клавишный регистр, 6 клавиш которого определяют команду на выполнение одной из следующих функций:

1. Автоматическое зажигание дуги и получение типового начального режима разряда: $I_d = 4 \text{ А}$, $U_d = 400 \text{ В}$.

2. Стабилизация параметров режима ионного источника.

3. Автоматическая настройка тока пучка МЗИ на заданное с клавиатуры дисплея и хранящееся в памяти микроЭВМ значение.

4. Стабилизация тока пучка МЗИ.

5. Режим периодического повторения настройки на величину требуемого тока пучка через заданный оператором период времени.

6. Режим измерения параметров объекта и отображения результатов на экране телевизионного монитора (без управления).

Код функции с клавишного регистра при нажатии кнопки "Автоматическое управление" поступает в специализированный блок КАМАК, по сигналу LAM от которого считывается в микроЭВМ.

Первый опыт эксплуатации описанной подсистемы показал следующие результаты: подсистема позволяет автоматически выводить источник на квазиоптимальный режим из выключенного состояния за среднее время порядка 10 ÷ 15 минут с отклонением от заданных ограничений не более 5% и стабилизировать ток пучка с погрешностью 3%. Опытному оператору после завершения автоматической настройки удавалось увеличить ток пучка при тех же ограничениях параметров разряда на величину не более 5%, что подтверждает правильность разработанного алгоритма управления.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика Г.Н.Флерова за постоянный интерес к работе, а также службу эксплуатации циклотрона У-400, возглавляемую Г.Г.Гульбекином и Б.Н.Гикалом, Ю.Д.Малухина и Л.М.Мельникову за помощь в отладке системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касьянов А.А. и др. - ПТЭ, 1988, №4, с.58; Препринт ОИЯИ Р9-87-307, Дубна, 1987.
2. Касьянов А.А. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-88-185, Дубна, 1988.
3. Касьянов А.А. и др. - В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.1, с. 105.
4. Третьяков Ю.П. и др. Препринт ОИЯИ Р7-4477, Дубна, 1969; Атомная энергия, 1970, т. 28, вып.5, с.423.
5. Третьяков Ю.П., Кутнер В.Б., Пасюк А.С. Препринты ОИЯИ Р7-84-578, Р7-84-774, Дубна, 1984.
6. Пасюк А.С., Третьяков Ю.П., Горбачев С.К. Атомная энергия, 1968, т.24, вып.1, с.21.
7. Пасюк А.С., Го Ци Цянь. Препринт ОИЯИ 1522, Дубна, 1964; ПТЭ, 1965, № 1, с.28.
8. Альпервольтомметр Ф-30. В кн.: Справочник по электроизмерительным приборам. Л.: Энергоатомиздат, 1983, с.113.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 сентября 1988 года.