

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

К 28

P9-88-185

**А.А.Касьянов, В.Б.Кутнер, В.М.Рыбин,
Ю.П.Третьяков**

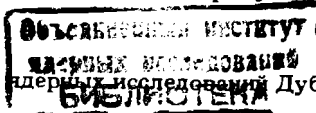
**АЛГОРИТМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ
ЦИКЛОТРОННОГО ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ**

1988

На циклотронах Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ для получения пучков многозарядных ионов (МЗИ) используются дуговые ионные источники с подогревным катодом и катодным распылением рабочего вещества^{/1,2/}. Режим работы источника оказывает существенное влияние на интенсивность пучка МЗИ, которая определяет эффективность и качество облучения мишеней и технических образцов. В течение всего цикла проводимого на циклотроне эксперимента источник многозарядных ионов (ИМЗИ) служит объектом пристального внимания оператора. Это связано со стохастичностью и дрейфом характеристик источника. Дрейф объясняется, например, распылением катода и рабочего электрода вследствие ионной бомбардировки, утолщением нити накала за счет осаждения испаренного с катода материала, а также присутствием нестационарных шумов. В связи с этим необходима периодическая подстройка параметров объекта. В случайные моменты времени могут иметь место нарушения вакуума, пробои между анодом и катодом, нитью накала и катодом, анодом и распыляемым электродом. При возникновении этих ситуаций, во избежание выхода источника из строя, от оператора требуется быстрая реакция: экстренный съем управляющего воздействия. В этом случае, как правило, происходит срыв режима. Его восстановление вследствие неоднозначности характеристик дугового разряда не может быть получено простой установкой прежних значений управляющих воздействий, а требует специального алгоритма. Неповторяемость характеристик ИМЗИ после его замены и переборки, а также необходимость учета рода используемого газа и твердого рабочего материала усложняют задачу получения оператором требуемых значений параметров режима.

С целью оперативного задания режима работы ИМЗИ циклотрона У-400, для контроля и стабилизации его параметров разработана и реализована автоматизированная система управления на базе аппаратуры КАМАК и интеллектуального микропроцессорного контроллера^{/3,4/}.

Выходным параметром ИМЗИ является ток многозарядных ионов, которые вытягиваются из источника и ускоряются в циклотроне. Наибольшее влияние на него оказывают расход вспомогательного газа, ток и напряжение дугового разряда, ток и напряжение подогрева катода, ток и напряжение на распыляемом электроде. Семейства экспериментально снятых зависимостей между этими параметрами приведены на рис.1. Характеристики $I_d(U_d)$ при различных значениях мощности подогрева $W_{пк}$ аналогичны показанным на рисунке, причем изменение $W_{пк}$



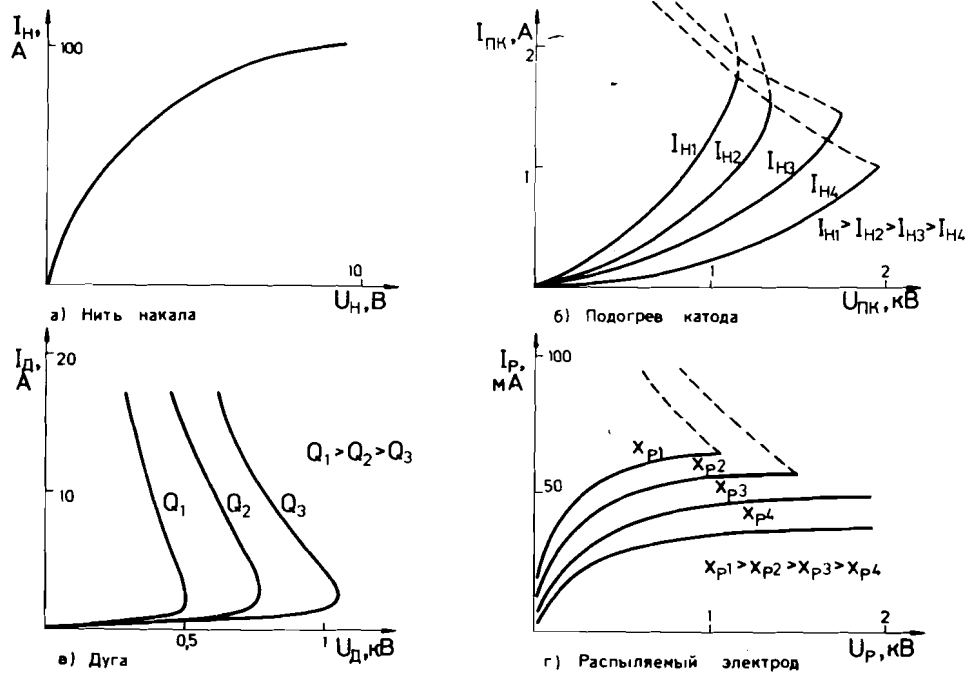


Рис.1. Графики зависимостей между параметрами ИМЗИ: а) зависимость тока накала нити I_H от напряжения U_H ; б) зависимость тока подогрева катода $I_{пк}$ от напряжения $U_{пк}$. Параметр — I_H ; в) зависимость тока дуги в импульсе $I_д$ от напряжения дуги в импульсе $U_д$. Параметр — расход газа Q ; г) зависимость тока распыляемого электрода I_p от напряжения на электроде U_p . Параметр — положение электрода x_p .

производит то же действие, что и изменение расхода вспомогательного газа Q . Характеристики распыляемого электрода $I_p(U_p)$ зависят от режима разряда: например, увеличение тока дуги $I_д$ смещает их в том же направлении, что и увеличение x_p — смещение электрода к центру разрядной камеры. На графиках вольтамперных характеристик цепей подогрева $I_{пк}(U_{пк})$ и распыляемого электрода $I_p(U_p)$ пунктиром изображены пробойные режимы.

Регулировка режима ИМЗИ производится в основном шестью независимыми параметрами: напряжениями выпрямителей тока нити накала, тока подогрева катода, питания дуги и распыляемого электрода, а также положениями иглы вентиля напуска вспомогательного газа и распыляемого электрода.

Автоматическое управление режимом работы ИМЗИ включает решение двух задач:

1. Программное получение заданных оператором значений параметров дугового разряда (ток и напряжение) и параметров распыляемого электрода (ток и напряжение), определяющих скорость распыления рабочего вещества;

2. Контроль и стабилизация полученного режима. Обобщенная структурная схема системы управления ИМЗИ представлена на рис.2. В ней можно выделить 6 взаимосвязанных локальных подсистем — подсистемы управления током накала нити, током подогрева катода, напуском вспомогательного газа, напряжениями выпрямителей питания дуги и распыляемого электрода, перемещением распыляемого электрода поперек разрядной камеры источника. Регулировка и стабилизация указанных токов и напряжений осуществляются с помощью тиристорных регуляторов (ТР), опорные напряжения на которые подаются от микро-

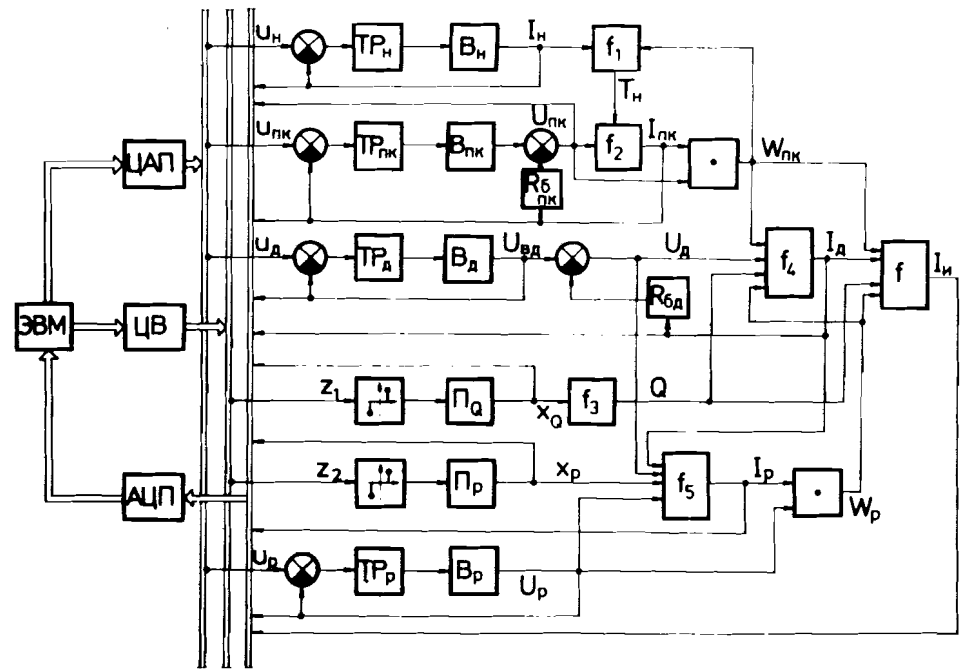


Рис.2. Структурная схема системы управления ИМЗИ. ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи; АЦП — аналогоцифровые преобразователи; ЦВ — цифровой выход; ТР — тиристорный регулятор; В — выпрямитель; П — приводы напуска газа и перемещения распыляемого электрода; $W_{пк, p}$ — мощности подогрева и распыления; T_H — температура нити; $R_б$ — балластное сопротивление; f — нелинейные функции. Индексы н, пк, д, р относятся соответственно к цепям накала нити, подогрева катода, дуги и распыляемого электрода.

ЭВМ через цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Перемещение иглы вентиля напуска газа и распыляемого электрода производится с помощью электродвигателей МС-160.

В структуре объекта управления выделяются три параметра с существенной инерционностью — это температура нити (T_H), мощность подогрева катода ($W_{пк}$) и расход вспомогательного газа (Q). Время установления температуры нити и мощности подогрева катода после скачкообразного изменения напряжения выпрямителя питания ~ 3 с. Время установления расхода газа после изменения положения иглы вентиля ~ 10 ÷ 30 с (в зависимости от рода газа). Эти параметры вносят основной вклад в суммарное время ввода ИМЗИ в рабочий режим, т.к. посылку очередного управляющего воздействия микро-ЭВМ осуществляет после окончания переходных процессов. Управление переменными состояниями объекта реализуется изменением шести независимых управляющих переменных, из которых 4 аналоговые ($u_H, u_{пк}, u_d, u_p$ — сигналы управления тиристорными регуляторами) и 2 дискретные (z_1, z_2 — релейные сигналы управления приводами напуска газа и перемещения распыляемого электрода).

Режим работы ИМЗИ с учетом локальных схем стабилизации в общем виде может быть описан совокупностью следующих алгебраических уравнений:

а) Нить накала

$$\begin{cases} I_H = k_1 \cdot u_H \\ T_H = f_1(I_H, W_{пк}) \end{cases} \quad (1)$$

б) Подогрев катода

$$\begin{cases} I_{пк} = k_2 \cdot u_{пк} \\ I_{пк} = f_2(U_{пк}, T_H) \\ U_{пк} / I_{пк} = R_{пк} \end{cases} \quad (2)$$

в) Дуговой разряд

$$\begin{cases} U_{вд} = k_3 \cdot u_d \\ I_d = f_4(U_d, W_{пк}, Q, W_p) \\ U_d = U_{вд} - I_d \cdot R_{бд}(I_d) \\ Q = f_3(x_Q) \end{cases} \quad (3)$$

г) Распыляемый электрод

$$\begin{cases} U_p = k_4 \cdot u_p \\ I_p = f_5(I_d, U_d, U_p, x_p) \end{cases} \quad (4)$$

где $k_1 \div k_4$ — коэффициенты пропорциональности; $U_{вд}$ — напряжение выпрямителя питания дуги; $R_{пк}$ — сопротивление промежутка "нить-катод" (1 кОм).

Задача программного ввода ИМЗИ в рабочий режим состоит в отыскании в реальном времени решения системы уравнений (1 ÷ 4), т.е. такого вектора входных независимых переменных $u_H, u_{пк}, u_d, u_p, x_p, x_Q$, который обеспечивал бы заданные значения I_d, U_d и I_p, U_p . Решение микро-ЭВМ получает итерационным покоординатным методом: изменяя какую-либо управляющую переменную при фиксированных остальных и измеряя выходные параметры объекта, добивается заданного значения одного параметра, затем изменением другой управляющей переменной подстраивается следующий параметр и т.д. Последовательность решения следующая: сначала изменением переменных $u_d, W_{пк}, x_Q$ решается система уравнений (3), в процессе решения которой при каждой вариации переменной $W_{пк}$ решаются системы (2) и (1). Далее изменением переменных u_p и x_p находится решение системы (4).

Настройка параметров дуги. Заданные ток и напряжение дуги достигаются подбором следующих входных переменных: напряжения выпрямителя питания дуги, мощности подогрева катода и расхода вспомогательного газа. Для зажигания дуги микро-ЭВМ выставляет начальные значения мощности подогрева катода и расхода газа, при которых становится вероятным дуговой разряд. Далее начинается подъем напряжения выпрямителя питания дуги. Если по достижении максимально допустимого значения напряжения выпрямителя разряд не загорается, делаются приращения по мощности подогрева катода до максимума, который определяется зажиганием дуги между нитью накала и катодом. Если и при этом разряд отсутствует, увеличивается расход вспомогательного газа при непрерывном контроле вакуума в циклотроне. После зажигания дуги итерационным методом находится решение системы уравнений (3). Требуемые параметры I_d и U_d микро-ЭВМ стремится получить при минимально возможном расходе газа (на грани срыва дуги), т.к. при этом имеет место максимальный выход многозарядных ионов. Поиск решения системы (3) осуществляется по следующему алгоритму: изменением напряжения выпрямителя настраивается на заданную величину ток дуги, затем приращением мощности подогрева катода либо расхода газа делается шаг в направлении заданного значения напряжения дуги. Далее итерационный процесс продолжается до тех пор, пока оба параметра I_d и U_d не достигнут с тре-

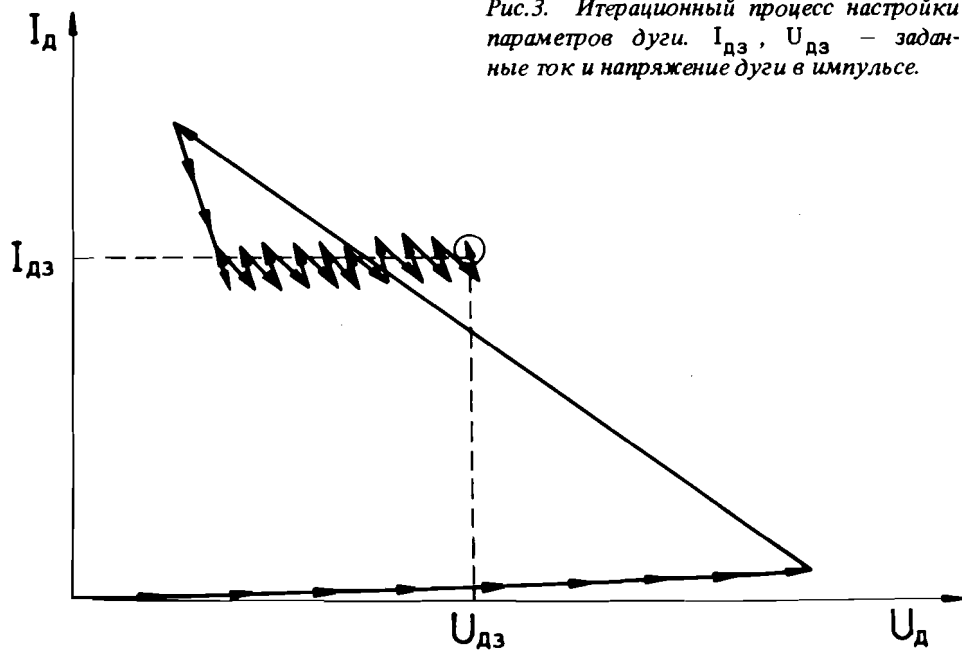


Рис.3. Итерационный процесс настройки параметров дуги. $I_{дз}$, $U_{дз}$ — заданные ток и напряжение дуги в импульсе.

буемой точностью заданных значений. Пример итерационного процесса приведен на рис.3. Вследствие существенной нелинейности зависимости тока дуги от напряжения на величины шагов управляющих воздействий накладываются ограничения, чтобы избежать возникновения недопустимо большого тока разряда при переходе от тлеющего разряда к дуговому, либо срыва дуги при попытке увеличить напряжение разряда за счет уменьшения мощности подогрева катода или расхода газа.

Иногда достичь заданных значений тока и напряжения не удается (обычно вследствие некорректности для данного состояния источника заданного соотношения I_d и U_d). Если при попытке увеличить напряжение до заданного происходит срыв дуги, микро-ЭВМ автоматически делает вывод о том, что для данного состояния источника достижение заданной величины напряжения дуги невозможно. Следует коррекция установки: $U_{дз} = 0,9U_{д1}$, где $U_{дз}$ — заданное напряжение дуги, $U_{д1}$ — величина напряжения на итерации, предшествующей срыву.

Настройка параметров распыляемого электрода. Требуемое напряжение на распыляемом электроде настраивается путем изменения величины управляющего воздействия u_p (опорное напряжение на тиристорный регулятор), а ток — перемещением электрода поперек разрядной камеры. При этом осуществляется постоянный контроль и ста-

билизация тока разряда. В случае возникновения пробоев между распыляемым электродом и анодом, ЭВМ резко снижает величину управляющего воздействия u_p и автоматически корректирует заданную уставку напряжения: $U_{pз} = 0,9U_{p1}$.

Настройка мощности подогрева катода. Мощность подогрева катода определяется током и напряжением, которые должны удовлетворять системе уравнений (2). Требуемый ток подогрева достигается за счет изменения величины управляющего воздействия $u_{пк}$, от которого он в рабочем диапазоне температур нити накала зависит линейно. Напряжение подогрева при этом является нелинейной функцией (обратной f_2) тока подогрева и температуры нити накала. Поддержание заданного сопротивления $R_{пк} = U_{пк}/I_{пк}$ достигается корректировкой тока накала нити. В процессе настройки возможно зажигание дугового разряда между нитью накала и катодом, который может привести к выходу источника из строя из-за разрушения нити в разряде. Для определения с достаточной точностью границы области зажигания разряда, величина приращения тока подогрева ограничена значением $\sim 0,1$ А. В случае зажигания дуги ЭВМ снимает управляющее воздействие, за-

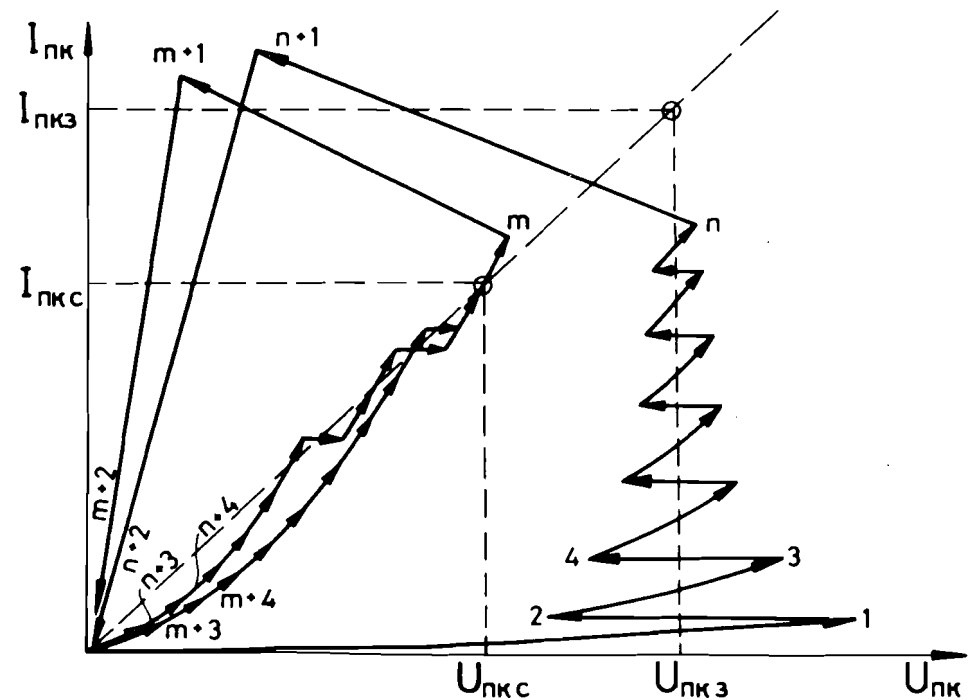


Рис.4. Итерационный процесс настройки параметров подогрева катода. $I_{пкз}$, $U_{пкз}$; $I_{пкс}$, $U_{пкс}$ — заданные и скорректированные ток и напряжение подогрева катода.

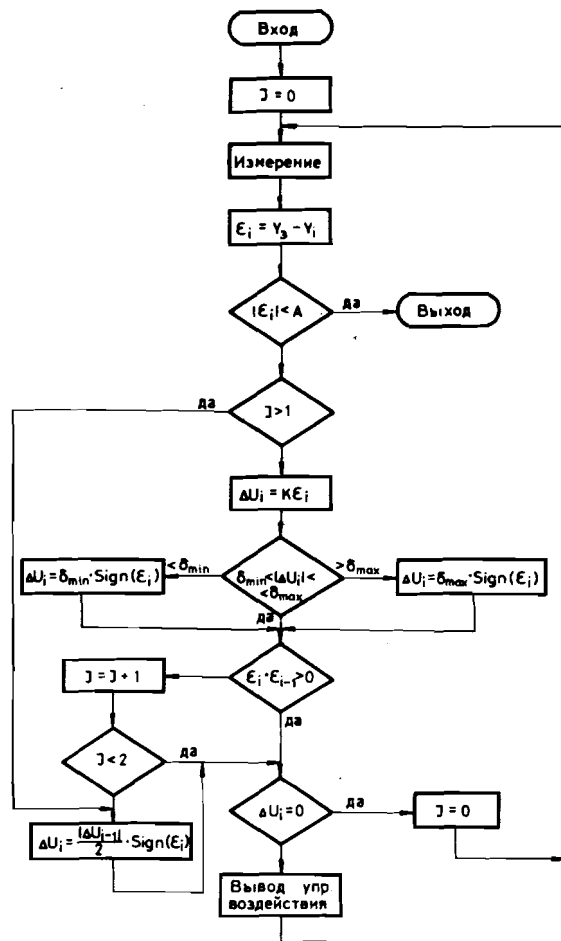


Рис.5. Алгоритм работы цифрового регулятора

тем делает повторную попытку получения требуемых параметров. Если дуга загорается снова, то снижается управляющее воздействие, и, если выполняется соотношение $U_{пкi} / I_{пкi} > R_{пк}$ ($U_{пкi}$, $I_{пкi}$ — напряжение и ток подогрева на итерации, предшествующей зажиганию дуги), — увеличивается ток накала нити, и процесс повторяется. В случае, когда $U_{пкi} / I_{пкi} < R_{пк}$, производится корректировка заданного тока: $I_{пкz} = 0,9 I_{пкi}$.

На рис.4. приведен пример итерационного процесса с двукратным зажиганием дуги между нитью и катодом (зажигание происходит после n -ой и m -ой итерации).

Если ЭВМ не может обеспечить заданные оператором значения параметров, то она, как ука-

зано выше, автоматически корректирует уставки и ограничения на область их изменения. Однако при этом сохраняются в памяти и прежние значения, заданные оператором. Так как характеристики и состояние ИМЗИ сильно зависят от продолжительности его работы, то оператору в диалоговом режиме предоставлена возможность ввода интервалов времени, через которые ЭВМ предпринимает попытки подстроить параметры до требуемых значений.

Как отмечено выше, настройка взаимосвязанных параметров ИМЗИ осуществляется итерационным методом. Функцию получения заданного значения какого-либо параметра путем изменения одной управляющей переменной при фиксированных остальных реализует цифровой регулятор. Алгоритм его работы был выбран исходя из учета нелинейности характеристик объекта, необходимости соблюдения ограничений на ве-

личины приращений параметров, а также статистического подхода к управлению. Блок-схема алгоритма представлена на рис.5. В процессе настройки измеряется значение выходного параметра Y_i , определяется величина ошибки ϵ_i , на основании которой вычисляется шаг управляющего воздействия Δu_i . Сначала он пропорционален величине ошибки, либо принимается равным максимально или минимально допустимому. После двукратной смены знака ошибки, на каждой последующей итерации шаг делится пополам. При уменьшении шага до нуля и недостижении выходным параметром заданного значения с требуемой точностью, процедура настройки возобновляется сначала.

Состав и характеристики функциональных модулей КАМАК описанной системы представлены в работе /4/. Так как система действует в условиях электромагнитных помех, то для измерения сигналов используются интегрирующие преобразователи напряжения в частоту импульсов. Кроме того, решение о выдаче управляющего воздействия микро-ЭВМ принимает на основе усредненных значений измеренных сигналов с фильтрацией промахов и сбойных кодов.

Система обеспечивает включение и ввод ИМЗИ в заданный режим за среднее время ~ 5 мин с приведенной погрешностью настройки параметров не более 1%.

Опытная эксплуатация и первые исследования системы показали, что она существенно облегчает работу оператора, уменьшает время вывода ИМЗИ на номинальный режим, позволяя тем самым увеличить эффективность работы источника и циклотрона.

Авторы благодарны академику Г.Н.Флерову за постановку задачи, А.М.Сухову за замечания при разработке алгоритмов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков Ю.П., Кутнер В.Б., Пасюк А.С. ОИЯИ, Р7-84-578, Р7-84-774, Дубна, 1984.
2. Третьяков Ю.П. и др. — АЭ, 1970, 28, с.423; ОИЯИ, Р7-4477, Дубна, 1969
3. Касьянов А.А. и др. В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г., ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.1, с.105.
4. Касьянов А.А. и др. ОИЯИ, Р9-87-307, Дубна, 1987.