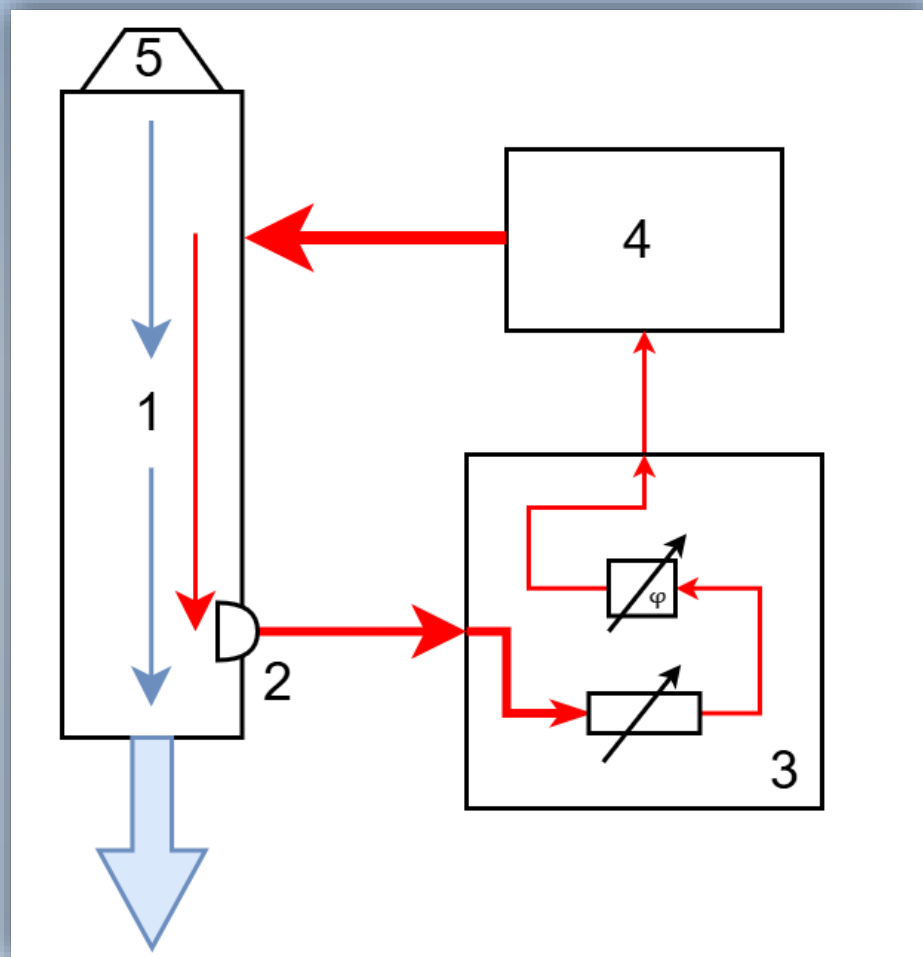


Автоматизация системы контроля уровня СВЧ-поля ускоряющей структуры ускорителя непрерывного действия.

доклад студ. Конеева А.Р., студ. Михалькова Т.П.,
ст.науч.сотр. Юрова Д.С.

Описание установки



Упрощенная схема СВЧ-питания ускорителя непрерывного действия на энергию 1 МэВ:

1 – ускоряющая структура

2 – петля связи

3 – СВЧ-панель

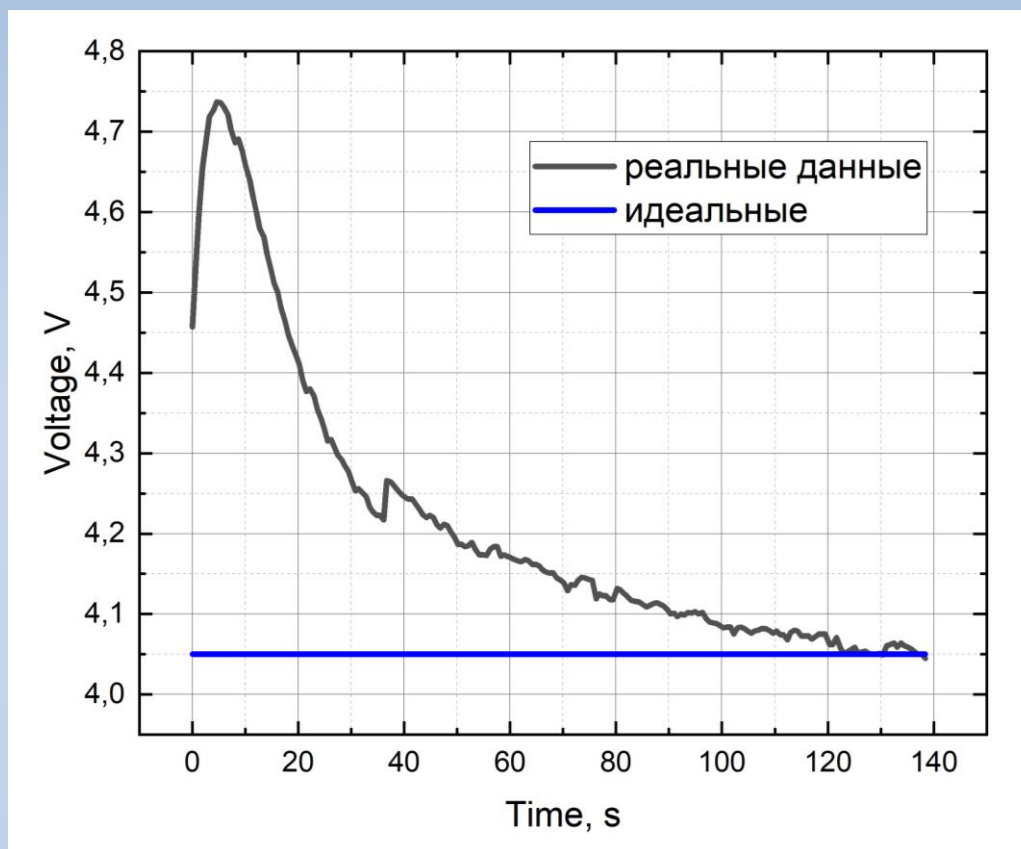
с фазовращателем и аттенюатором

4 – клистрон

5 – электронная пушка

Ускорение электронов происходит за счет их взаимодействия с электромагнитным СВЧ-полем, существование которого поддерживается за счет цепи обратной связи в системе питания ускорителя.

Нестабильность СВЧ-поля в момент включения



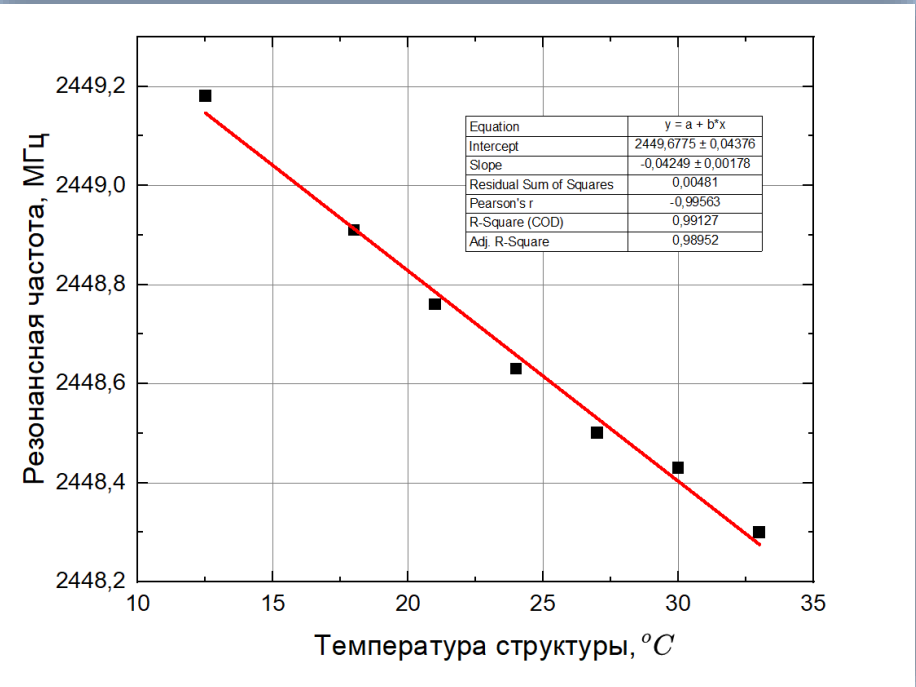
Такая нестабильность поля – результат тепловых процессов, происходящих в ускоряющей структуре после момента подачи на неё СВЧ-мощности от клистрона.

Причины тепловой неустойчивости

Как известно, ускоряющую структуру можно рассмотреть как колебательный контур с высокой добротностью. Для него возможен сдвиг резонансной частоты Δf_0 , который зависит от температуры структуры:

$$\Delta f_0 \sim -\alpha_T T$$

α_T — коэффициент пропорциональности $\left[\frac{\text{МГц}}{^\circ\text{C}} \right]$

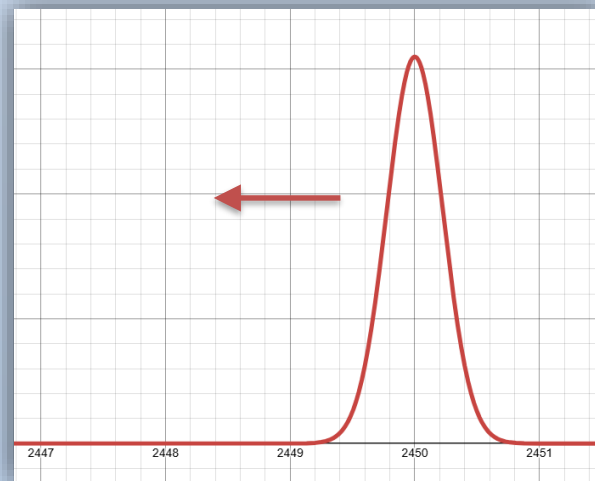
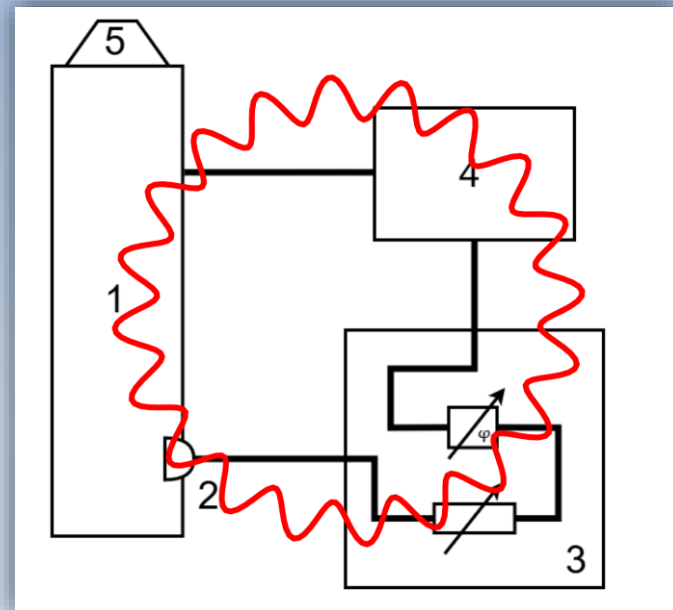


При подаче СВЧ-мощности в ускоряющую структуру происходит нагрев её стенок, что приводит к изменению резонансной частоты ускоряющей структуры.

Причины тепловой неустойчивости

Заметим, что в силу наличия обратной связи в системе питания ускорителя мы будем выделять только тот СВЧ-сигнал, длина волны которого укладывается целое число раз в электрической длине всей СВЧ-цепочки. Для сигнала с такой длиной волны (и соответствующей частотой) будет выполнено условие баланса фаз, что обеспечит его поддержание во время работы ускорителя.

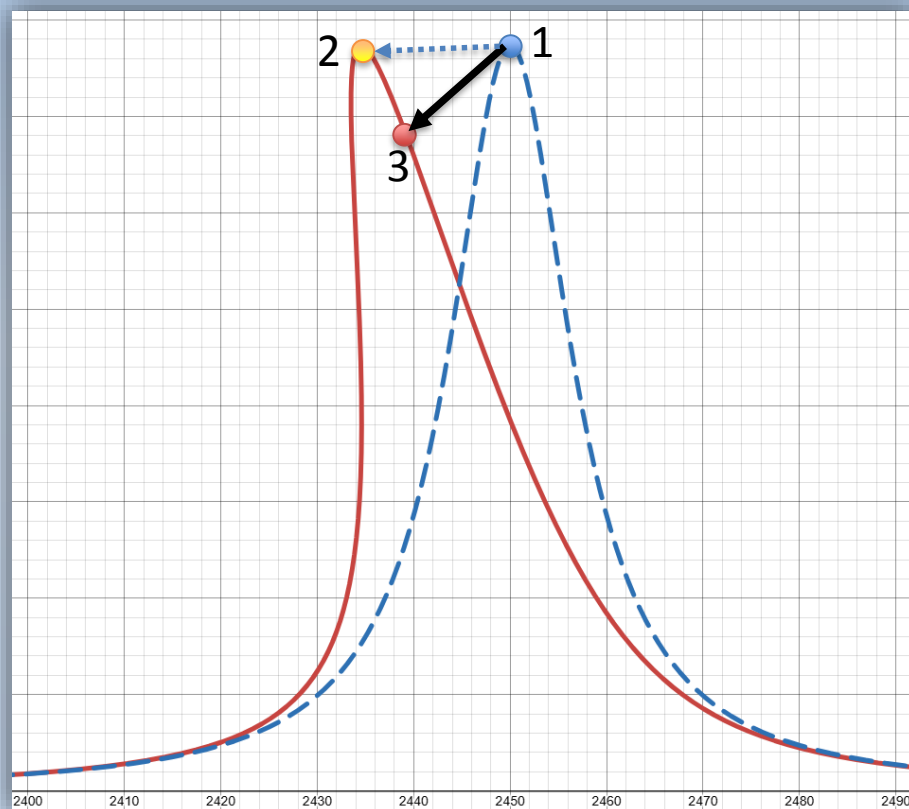
Если рассматривать ускоряющую структуру как колебательный контур, то амплитуду его реакции на внешнее возбуждение будет описывать некоторая АЧХ. С ростом температуры график АЧХ будет сдвигаться влево за счет смещения резонансной частоты при нагреве.



Причины тепловой неустойчивости

Результирующим графиком станет наклонившаяся кривая, причем итоговая амплитуда станет меньше за счет дополнительного набегу фазы в таких СВЧ-элементах, как кабеля, ферритовые вентили и проч.

Заметим, что с помощью фазовращателя мы можем менять набег фазы в контуре и за счет этого менять частоту сигнала, для которого будет выполняться условие баланса фаз.



Таков качественный механизм появления неустойчивости уровня СВЧ-поля в момент включения ускорителя. В соответствии с этим предлагаются следующие решения.

Цели данной работы

Для устранения неустойчивости СВЧ-поля в момент включения предлагается использовать два метода:

- регулировка фазы СВЧ-сигнала в автоколебательном контуре системы питания ускорителя в реальном времени;
- регулировка температуры ускоряющей структуры (предварительный прогрев).

Метод регулировки фазы СВЧ-сигнала

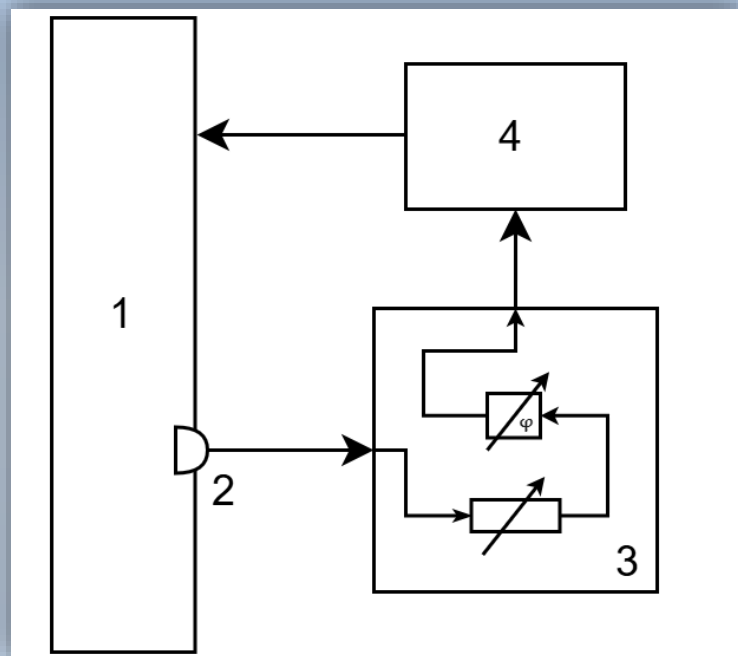


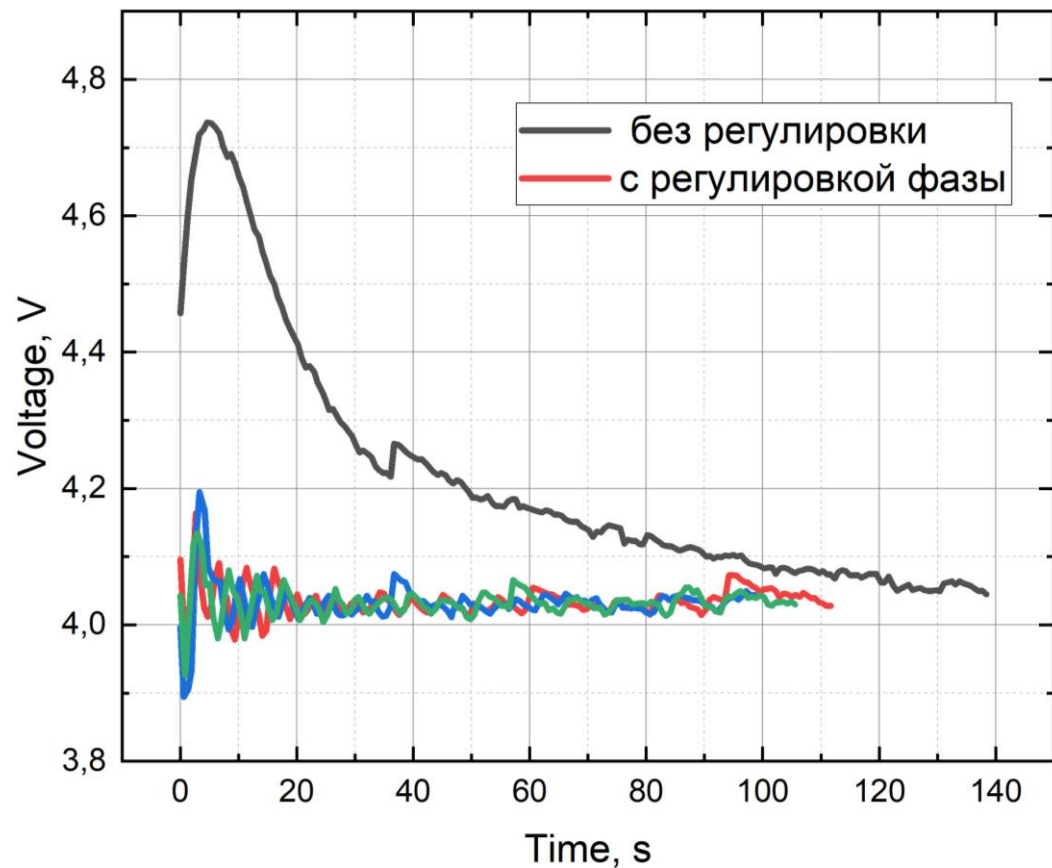
Схема установки.

- 1 – ускоряющая структура, 2 – петля связи,
- 3 – СВЧ-панель с аттенюатором и фазовращателем,
- 4 – клистрон.

Метод основан на плавной регулировке фазы СВЧ-сигнала с помощью фазовращателя, что позволяет оставаться на одном и том же уровне резонансной кривой с течением времени.

Для этого был написан и настроен алгоритм управления фазой на фазовращателе. Алгоритм реализован на языке Python и выполняется в инженерной программе, которая предоставляет удобный интерфейс управления ускорителем.

Результаты метода регулировки фазы



Плюсы метода:

- позволяет поддерживать уровень поля на приемлемом уровне
- не требует дополнительного физического оборудования
- возможность подстройки под текущий режим работы

Минусы метода:

- ошибки в регулировке
- необходимость перестройки под другие режимы работы

Black: 4.21 ± 0.18 V (0.26V) Color: 4.03 ± 0.02 V

Метод предварительного прогрева ускоряющей структуры

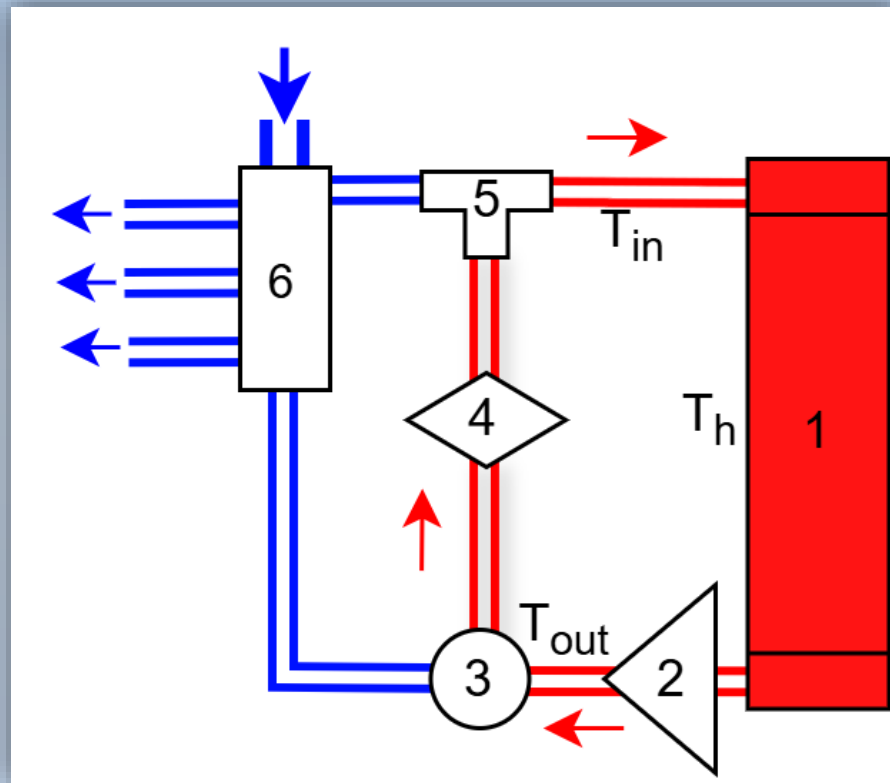


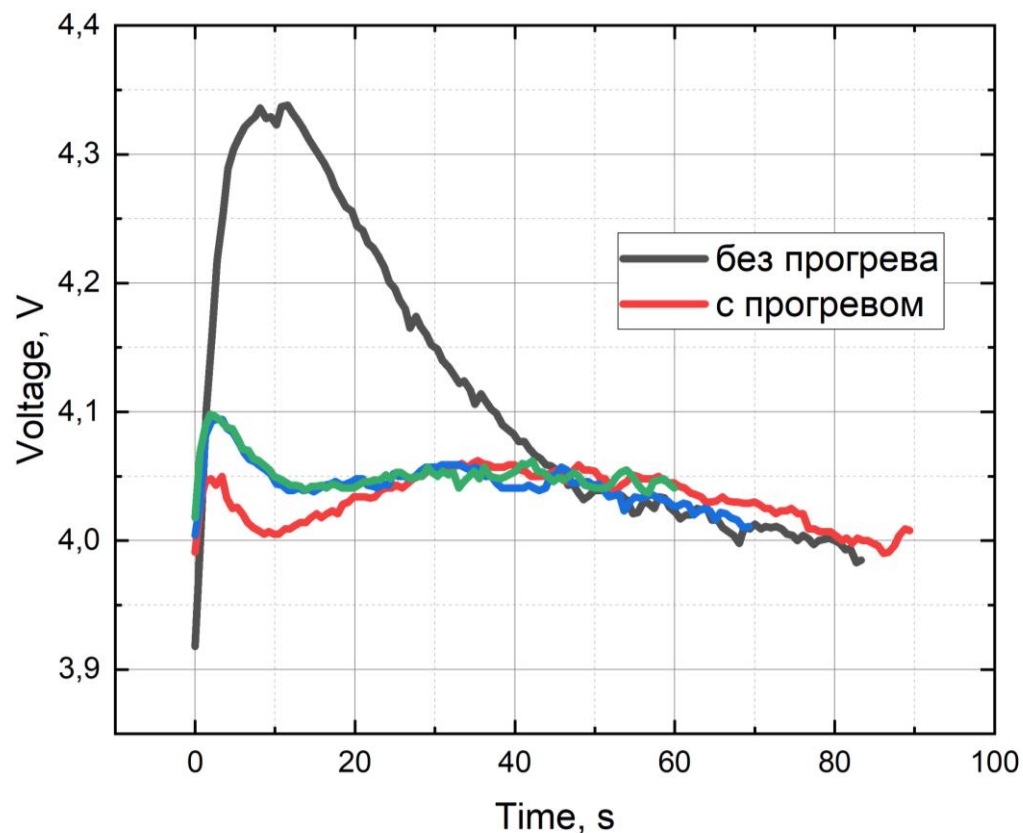
Схема установки:

1 – ускоряющая структура, 2 – насос,
3 – трехходовой клапан, 4 – ТЭН, 5 – тройник,
6 – общий коллектор.

Суть метода заключается в предварительном прогреве структуры до некоторой температуры T_h , чтобы минимизировать сдвиг резонансной частоты при подаче СВЧ-мощности.

Алгоритм выполнения метода также реализован на языке Python в той же инженерной программе. Он управляет поведением трехходового клапана и нагревательного элемента.

Результаты метода прогрева



Black: $4.11 \pm 0.12V$ (0.14V) Color: $4.04 \pm 0.02V$

Плюсы метода:

- большая стабильность поля
- большая повторяемость при включениях
- возможность подстройки под различные режимы работы
- возможность контроля температуры ускоряющей структуры и поддержания резонансной частоты во время работы ускорителя

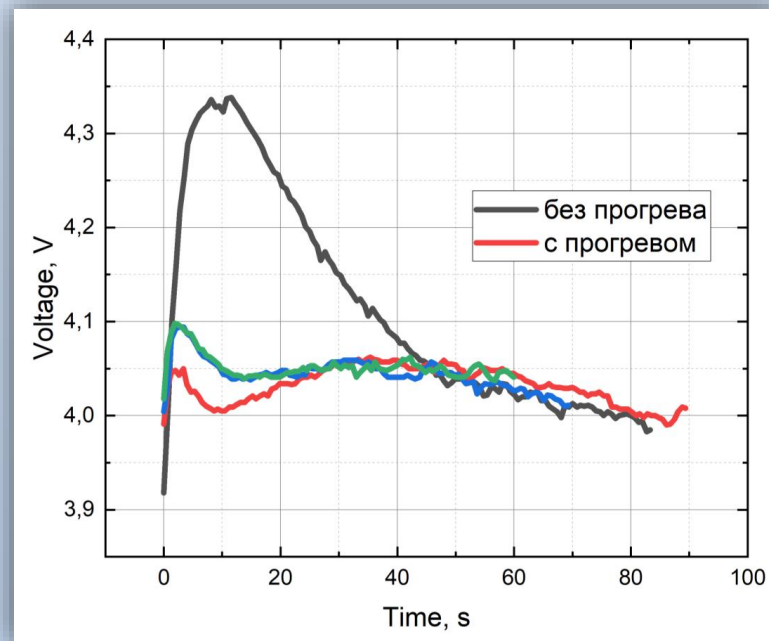
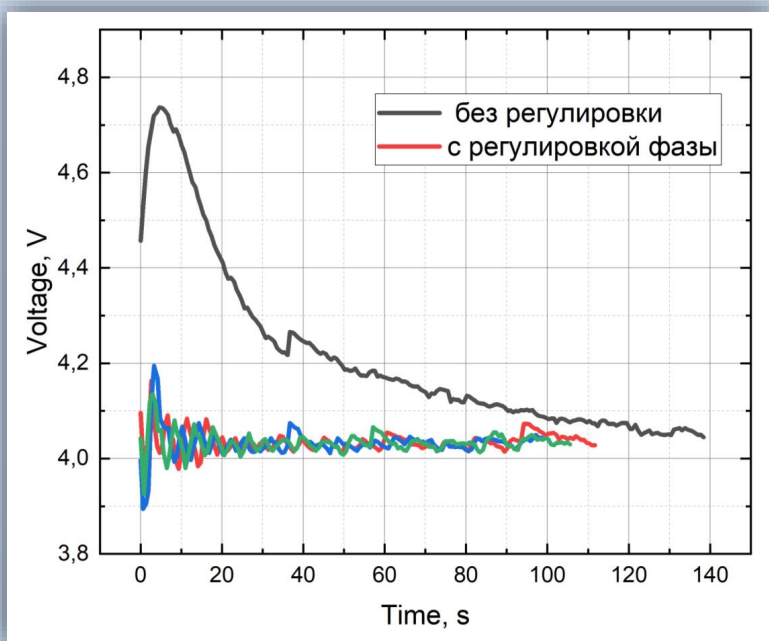
Минусы метода:

- требуется дополнительное оборудование
- увеличивает расход электроэнергии
- для предварительного прогрева необходимо некоторое время

Заключение

Было показано, что с помощью озвученных выше методов можно контролировать уровень СВЧ-поля с хорошей точностью.

В дальнейших исследованиях планируется изучить возможность комбинации данных методов для получения лучшего результата.



Спасибо за внимание!

Причины тепловой неустойчивости

Известно, что собственная резонансная частота ускоряющей структуры зависит от рассеиваемой в ней СВЧ-мощности P и её начальной температуры T_0 (температуры охлаждающей жидкости) следующим образом:

$$f_0 = f_0(P = 0) - \chi P - \Delta f(T_0)$$

Можно показать, что в таком случае зависимость этих параметров от фазы на фазовращателе будет следующей:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \alpha \left(\chi P + \Delta f + \frac{f_0(0) + \Delta f}{2Q} \sqrt{\frac{P_0}{P} - 1} \right) - \arctan \left(\sqrt{\frac{P_0}{P} - 1} \right) \\ \alpha \left(\chi P + \Delta f - \frac{f_0(0) + \Delta f}{2Q} \sqrt{\frac{P_0}{P} - 1} \right) + \arctan \left(\sqrt{\frac{P_0}{P} - 1} \right) \end{cases}$$

$$\text{где } \Delta f = \alpha_T (T - T_0), \quad \alpha_T = 42 \left[\frac{\text{kHz}}{^\circ\text{C}} \right].$$