

АНАЛИЗ И МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАТОРОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

А.И. Кваша, Ю.В. Киселев, А.С. Ковалишин, В.С. Копин
 Институт ядерных исследований РАН, 117312, Москва, Россия
 E-mail: kvasha@inr.ru

Приводятся результаты моделирования системы автоматического регулирования, стабилизирующей собственную частоту резонаторов с трубками дрейфа линейного ускорителя ИЯИ РАН. Рассматриваются способы повышения качества системы за счёт оптимального выбора параметров ПИ-регулятора и исполнительных органов системы – электронагревателя и клапана технической воды на входе теплообменника. Намечены пути модернизации системы с использованием промышленных микропроцессорных регуляторов, использующих широко-импульсную модуляцию в качестве управляющего воздействия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Системам стабилизации собственной частоты резонаторов с трубками дрейфа начальной части (НЧУ) сильноточного линейного ускорителя протонов института ядерных исследований РАН посвящено достаточно большое количество публикаций [1-4]. Это связано с тем, что работа над модернизацией и улучшением этой системы продолжается непрерывно, поскольку разработанная и изготовленная 30 лет назад аппаратура системы постепенно выходит из строя, а требования к ней становятся более жесткими. Последнее связано с тем, что на ускорителе постоянно увеличивается средний ток пучка за счёт увеличения скважности ВЧ-импульсов, что, в свою очередь, приводит к росту тепловыделений в резонаторах и соответствующему увеличению нагрузки на системы автоматического регулирования (АРЧТ), стабилизирующие собственные частоты резонаторов НЧУ. Напомним некоторые особенности работы системы АРЧТ на линейном ускорителе ИЯИ РАН.

Системы автоматического регулирования собственной частоты резонаторов (АРЧТ) используют тепловой способ управления собственной частотой резонатора за счёт изменения температуры воды, охлаждающей трубки дрейфа. При этом температура воды, охлаждающей корпус резонатора, поддерживается постоянной, поскольку удельный уровень ВЧ-потерь в корпусе резонатора на порядок ниже, а эффективность управления собственной частотой в несколько раз ниже по сравнению с трубками дрейфа. Для воздействия на температуру воды, охлаждающей трубки дрейфа, реально имеются два устройства – электронагреватель (ЭН), запитываемый от тиристорного регулятора, и регулируемый клапан технической воды (КТВ) в первичном контуре теплообменника (ТО). Управляя этими двумя устройствами необходимо обеспечить работу системы АРЧТ в трёх основных режимах:

- в режиме прогрева – перед вводом ВЧ-мощности в резонатор;
- статическом – после ввода ВЧ-мощности в резонатор и установлении температуры в системе охлаждения резонатора;

- переходном – в процессе ввода/вывода ВЧ-мощности в резонатор.

Последний режим является основополагающим из-за довольно низкой надёжности системы ВЧ-питания резонаторов НЧУ, состоящей из пяти автономных ВЧ-каналов усиления. При отключении ВЧ-канала тонкостенные трубки дрейфа быстро (в течение 15...20 с) охлаждаются до температуры воды, которая в установившемся режиме на несколько градусов ниже резонансной температуры меди трубок дрейфа (см. таблицу). При этом расстройка резонатора достигает нескольких полос высокочастотного резонатора, и повторный ввод ВЧ-мощности становится возможным только после прогрева воды во вторичном контуре системы охлаждения, подводящих трубопроводов и собственно трубок дрейфа до рабочей температуры меди.

№ резонатора	1	2	3	4	5
Температурный градиент, °С	1.6	2.3	2.5	1.8	6.5
Мощность ВЧ-потерь в трубках дрейфа, кВт	5.2	27.6	27.6	18	12

Естественно, имеются два очевидных способа повышения скорости прогрева резонатора. Первый из них – включение канала усиления как можно быстрее после отключения. К сожалению, чаще всего повторное немедленное включение оказывается невозможным. Второй – разогрев резонатора ВЧ-потерями, а не за счёт прогрева охлаждающей резонатор воды. Поскольку резонатор сразу же после отключения оказывается расстроенным, то в этом случае необходимо на время прогрева подключать ВЧ-возбуждения канала к специальному перестраиваемому генератору, частота которого «следит» за частотой резонатора. Этот способ в случае лампового ВЧ-канала усиления трудно практически реализовать из-за заметного уровня ВЧ-наводок из мощных каскадов усиления, как на перестраиваемый генератор, так и на соседние ВЧ-каналы. Источник наводок – узлы ввода анодного питания и накала ламп. Таким образом, прежде всего необходимо рассмотреть все возможности повышения качества существующей

системы автоматического регулирования. Для этого лучше всего использовать моделирование такой системы.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АРЧТ

Подробное описание первого варианта модели системы приведено в работе [4]. Как следует из описания модели, система АРЧТ является системой с переменной структурой. При прогреве резонатор ведёт себя как обыкновенная масса металла, прогреваемая водой в каналах охлаждения вплоть до резонансной температуры T_0 . При этом, температура воды и металла в установившемся режиме одинаковая. После ввода ВЧ-мощности в структуре системы появляются два новых элемента: фазовый детектор, вырабатывающий сигнал, пропорциональный расстройке резонатора, и высокодобротный резонатор, охваченный так называемой «естественной» обратной связью:

$$P_d(t) = \frac{P_0}{1 + (2Q_n \frac{df_p(t) - df_0}{f_0})^2}, \quad (1)$$

где, в свою очередь, $df_p(t) \equiv P_d(t)$. Здесь df_0 – начальная расстройка резонатора, $df_p(t)$ – текущая расстройка резонатора, определяемая ВЧ-потерями в трубках дрейфа резонатора. Именно появление этого звена является основной причиной неустойчивости системы стабилизации собственной частоты резонатора. Кроме того, в отличие от режима прогрева, при возникновении ВЧ-потерь в резонаторе появляется температурный градиент между металлом и водой, в результате чего температура воды в каналах охлаждения понижается с тем, чтобы сохранить резонансную температуру металла трубок дрейфа. Ограниченный объём работы [4] не позволил привести основные результаты моделирования существующей системы и наметить пути её модернизации. Напомним, что в существующей системе электронагреватель управляется по сигналу расстройки резонатора, а клапан технической воды включается только тогда, когда величина расстройки превышает заданную величину (так называемая зона нечувствительности КТВ). При отсутствии ВЧ-потерь в резонаторе сигналом обратной связи является отклонение температуры воды в канале охлаждения трубок дрейфа от «уставки» T_0 , величина которой соответствует требуемой частоте резонатора. После ввода ВЧ-мощности сигналом обратной связи становится расстройка резонатора, величина которой вырабатывается в измерительном устройстве – фазовом детекторе.

По сравнению с работой [4] в модель были внесены существенные изменения, позволяющие ещё больше приблизить её к реальной системе. В частности, в модель введён блок фазового детектора в цепи обратной связи, включённый между фидером возбуждения резонатора и резонатором. В этом блоке учитывается нелинейная зависимость выходного сигнала от мощности ВЧ-канала (P_0) и мощности, рассеиваемой в трубках резонатора (P_d), а также нелинейность фазовой характеристики резонатора:

$$U_{PD}(t) = k_{dl} \left(\frac{P_0}{2 + \xi^2(t)} \right)^{1/2} \sin(\varphi_{sp} + \arctan \xi(t)), \quad (2)$$

где $\xi(t) = 2Q_n \frac{df_0 - df_p(t)}{f_0}$, φ_{sp} – «уставка», определя-

ющая расстройку резонатора в установившемся режиме, k_{dl} – коэффициент, учитывающий ослабление сигналов при передаче с измерительной петли резонатора и направленного ответвителя в фидере возбуждения резонатора. В доработанной модели дополнительно учтена квадратичность регулировочной характеристики ЭН, а также внесены изменения в блок управления КТВ (блок CV [4]), позволяющие моделировать импульсное питание привода КТВ.

Настройка модели, как и реальной системы, заключается в оптимальном подборе следующих параметров: зоны нечувствительности КТВ, скорости изменения расхода холодной воды на входе ТО, усиления и постоянной интегрирования ПИ-регулятора в цепи обратной связи системы авторегулирования. На первом этапе моделирования системы АРЧТ (на примере резонатора №3 НЧУ) скорость изменения расхода холодной воды изменялась за счёт увеличения сигнала на входе интегратора, моделирующего привод КТВ в блоке CV [4]. В этом случае обеспечить устойчивую работу системы как в переходном, так и в стационарных режимах удаётся только при низкой скорости КТВ и идеальном ПИ-регуляторе. Замена интегратора RC-цепью или ограничение диапазона интегрирования, что имеет место в реальной аппаратуре, как правило, приводит к возникновению неустойчивости системы.

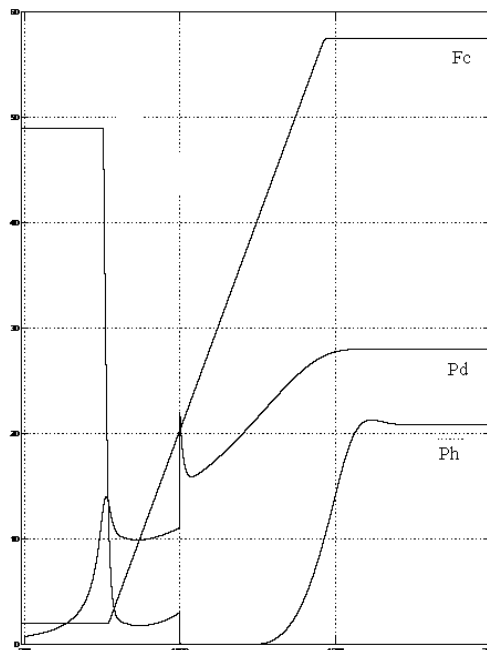


Рис. 1 Процесс ввода ВЧ-мощности в резонатор.
 P_d – ВЧ-мощность, вводимая в резонатор, кВт;
 P_h – мощность электронагревателя, кВт;
 F_c – расход холодной воды через теплообменник, %

На Рис.1 приведены результаты моделирования двухступенчатого ввода ВЧ-мощности в резонатор для вышеуказанного случая. Полное время открытия

КТВ достигает 10 мин. Именно при такой скорости изменения расхода холодной воды в ТО система остаётся устойчивой.

Характерно, что на каждом этапе ступенчатого изменения уровня ВЧ-мощности процесс стабилизации собственной частоты резонатора происходит с обязательным перегревом температуры трубок дрейфа, который сопровождается понижением частоты резонатора. Однако, при низкой скорости перемещения КТВ затягивается процесс прогрева резонатора при аварийных отключениях канала усиления. Поэтому желательно использовать быстродействующий привод, а скорость перемещения КТВ изменять за счёт импульсного питания электромотора привода.

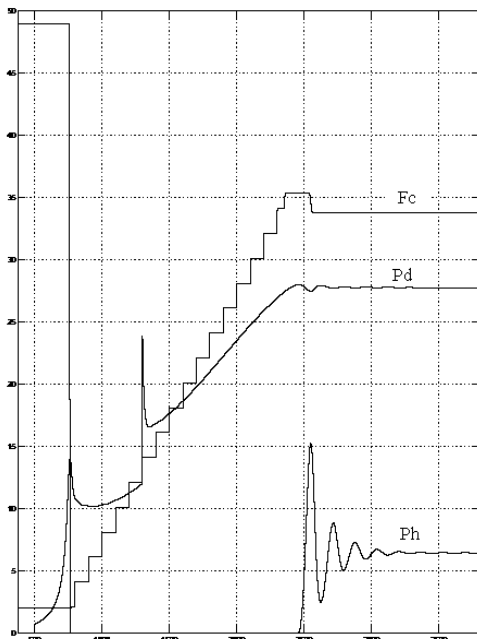


Рис.2 Двухступенчатый ввод ВЧ-мощности в резонатор при импульсном управлении КТВ

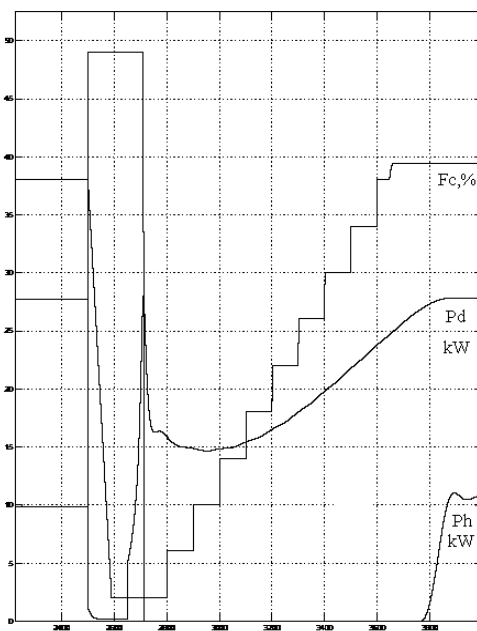


Рис.3. Переходные процессы в системе при кратковременном отключении и повторном включении ВЧ-канала

В системе АРЧТ импульсное питание имеет место только в процессе открытия КТВ, а процедура записывания клапана происходила в непрерывном режиме, с максимальной скоростью, что заметно ускоряет процедуру прогрева резонатора при кратковременных отключениях канала усиления.

На Рис.2,3 приведены примеры моделирования импульсного регулирования скорости привода КТВ – при двухступенчатом вводе ВЧ-мощности (Рис.2) и кратковременном отключении канала (Рис.3) с повторным вводом ВЧ-мощности.

Следует отметить, что при импульсном управлении приводом КТВ заметно повышается устойчивость системы. Так, даже при замене интегратора инерционным звеном система остаётся устойчивой в диапазоне изменения периода повторения импульсов от 100 до 25 с и длительности импульсов от 2 до 0.5 с, соответственно. Приведенные результаты моделирования хорошо совпадают с реальными процессами в системе.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АРЧТ С ДРУГИМИ СИСТЕМАМИ

До сих пор анализ системы АРЧТ проводился без учёта функционирования быстродействующих систем стабилизации амплитуды и фазы ВЧ-поля в резонаторе ускорителя. На самом деле эти системы могут заметно повлиять на работу системы АРЧТ также как и система АРЧТ на эффективность работы систем стабилизации ускоряющего поля в резонаторе.

3.1. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ

Эта система стабилизирует амплитуду ВЧ-поля в резонаторе за счёт регулирования анодного импульсного напряжения на выходных ВЧ-каскадах канала усиления. Причём замыкание обратной связи системы авторегулирования, стабилизирующей амплитуду ВЧ-поля, происходит автоматически – при равенстве амплитуды сигнала обратной связи и величины «уставки». Очевидно, что при этом размыкается «естественная» обратная связь (1) и устойчивость системы АРЧТ возрастает. Поэтому вполне реальна ситуация, когда систему АРЧТ «качает» при амплитуде ВЧ-поля ниже «уставки», а после выхода на уровень стабилизации амплитуды поведение системы АРЧТ также стабилизируется (см. Рис.4).

3.2. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ФАЗЫ

Связь с системой стабилизации фазы появляется в режиме ускорения пучка. Известно, что в резонансных ускорителях сгустки заряженных частиц сдвинуты по фазе относительно ВЧ-поля в резонаторе, что приводит к возмущениям не только амплитуды, но и фазы ускоряющего поля. Система стабилизации фазы изменяет фазу ВЧ-возбуждения резонатора таким образом, чтобы фаза ВЧ-поля в резонаторе осталась неизменной и при нагрузке пучком. Поскольку фазовый детектор системы АРЧТ включён между фидером и резонатором, на его выходе

появляется ложный сигнал расстройки, определяемый возмущением фазы ускоряющего поля.

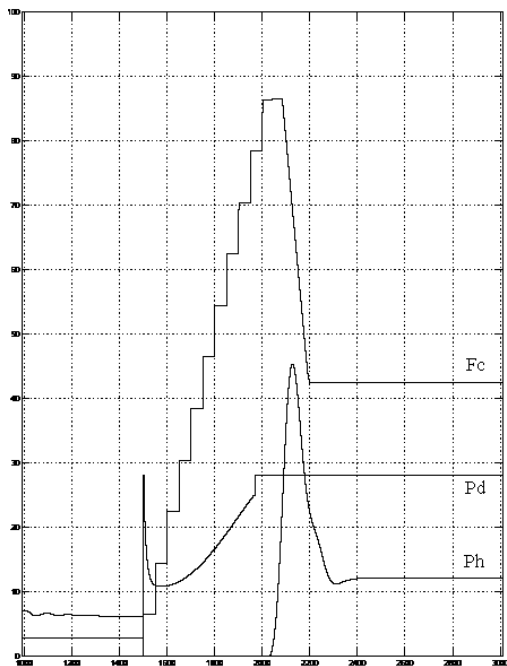


Рис.4. Ввод ВЧ-мощности в резонатор при работе системы стабилизации амплитуды

Полагая, что резонатор возбуждается от двух генераторов тока – ВЧ-генератора и пучка, нетрудно получить выражение, определяющее фазовый сдвиг φ_g тока ВЧ-генератора при полной компенсации нагрузки пучком в настроенном резонаторе:

$$\cos \varphi_g = \frac{1}{\sqrt{1 + (\eta_b t g \varphi_s)^2}}, \quad (3)$$

где $\eta_b = \frac{P_b}{P_b + P_w}$; P_b – мощность, забираемая пучком; P_w – мощность потерь в меди резонатора; φ_s – равновесная фаза сгустков пучка. При $(\eta_b t g \varphi_s)^2 \ll 1$ выражение (3) упрощается:

$$\varphi_g \sim \eta_b t g \varphi_s. \quad (3,a)$$

Как следует из выражения (3,a) при импульсном токе пучка 10...12 мА в линейном ускорителе ИЯИ РАН величина ложной расстройки не превышает нескольких градусов и практически не нарушает работу системы ВЧ-питания. Однако, при ускорении более интенсивных импульсных токов пучка необходимо переходить от фазового детектора к частотному, как это реализовано на современных высокоточных ускорителях.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АРЧТ

Необходимость модернизации системы АРЧТ определяется следующими причинами:

- разработанная 30 лет назад аналоговая электронная аппаратура обладает низкой помехозащищенностью и не обеспечивает требуемые параметры регулятора и системы АРЧТ в целом;

- существующий привод КТВ не обеспечивает полное закрытие протока холодной воды через ТО во время прогрева резонатора, что, очевидно, затягивает процесс ввода ВЧ-мощности в резонатор.

К настоящему времени на всех системах установлены новые запорно-регулирующие клапаны с полным временем перемещения 1-2 мин. В качестве регулятора решено использовать микропроцессорные регуляторы типа ТРМ-202 и ТРМ-12-ТС производства "Овен". При этом на регулятор ТРМ-202 (двухканальный) возлагаются контрольные функции измерения температур в двух точках и отключение электронагревателя при аварийных ситуациях. Второй, ПИ-регулятор ТРМ-12-ТС осуществляет регулирование собственной частоты резонатора за счёт воздействия на электронагреватель и клапан технической воды.

Микропроцессорные регуляторы представляют по двунаправленному интерфейсу RS-485 новые дополнительные возможности:

- регистрацию данных (в нашем случае температуры) на персональном компьютере;
- установку конфигурации регулятора с компьютера.

Испытания микропроцессорных регуляторов только начались, и окончательные результаты будут представлены после испытания на модели и в реальной аппаратуре.

5. АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ АРЧТ

Модернизация систем АРЧТ подразумевает не только замену ячеек регулятора в аппаратуре управления, но и регистрацию данных, и возможность конфигурирования регуляторов и изменения их параметров.

Используемые микропроцессорные регуляторы производства «Овен» позволяют осуществлять связь с компьютером по двухпроводной линии по протоколу RS-485. Для осуществления такой связи необходим один кабель (витая пара), который позволяет подключать до 32-х регуляторов. При использовании интерфейса RS-485 задача автоматизации систем АРЧТ успешно решается с использованием программного обеспечения LabView или SCADA system OWEN PROCESS MANAGER v.2 (OPM v.2).

С учетом вышесказанного, для решения рассмотренной задачи автоматизации предполагается выделить следующие сигналы, связываемые с компьютером по протоколу RS-485:

1. Регистрация *динамических* параметров состояния систем АРЧТ:
 - температуры воды корпуса резонаторов;
 - температуры воды трубок дрейфа;
 - температуры технической воды;
 - фазовой расстройки резонатора;
 - тока электронагревателя;
 - положения клапана КТВ.
2. *Конфигурирование* регуляторов:

- установка необходимого закона регулирования (П, ПИ, ПИД);
- установка необходимых коэффициентов или их коррекция, установка «уставок»;
- установка зоны нечувствительности КТВ.

3. Регистрация *статических* параметров состояния систем.

4. Дистанционное *управление* системами.

Для завершения работ по автоматизации модернизированных систем АРЧТ необходимо приобрести дополнительные модули обмена информацией (по протоколу RS-485) с технологическим оборудованием и разработать соответствующее программное обеспечение.

Таким образом, модернизация систем АРЧТ с применением микропроцессорных регуляторов и замена клапанов на запорно-регулирующие позволили решить проблему качества систем, вплоть до оптимальных, в автономном режиме работы. Процесс автоматизации систем находится в стадии реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Ковалишин и др. Исследование системы автоматического регулирования собственной частоты резонаторов в переходном и основном режимах работы // *Труды X Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 1986, т.1, с.281.
2. А.И. Кваша и др. Исследование систем стабилизации собственной частоты резонаторов начальной части ЛУМФ ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент)»*. 1990, выпуск 10/18, кн.1.
3. А.И. Кваша и др. Особенности ввода ВЧ-мощности в резонаторы ускорителя МФ // *Доклад на XIII Всероссийском совещании по ускорителям заряженных частиц*. Дубна, 12-15 окт. 1992.
4. Yu. Kiselev, A. Kovalishin, A. Kvasha, D. Hlustin. Simulation of the INR RAS DTL frequency stabilization system // *Proceedings of RUPAC 2006*. Novosibirsk, Russia, p.258-260.

ANALYSIS AND MODERNIZATION OF THE INR DTL FREQUENCY CONTROL SYSTEM

A.I. Kvasha, Yu.V. Kiselev, A.S. Kovalishin, V.S. Kopin

Results of the INR DTL frequency control system modeling are described. Methods of the control system quality improving by means of right choice of the heater and the control valve parameters are presented. The ways of the existing control system up-grade with using of the up-to-date microprocessor controller for the heater and control valve operation are selected.

АНАЛІЗ І МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСНОЇ ЧАСТОТИ РЕЗОНАТОРІВ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

A.I. Kваша, Ю.В. Кисельов, А.С. Ковалішин, В.С. Копін

Наведено результати моделювання системи автоматичного регулювання, що стабілізує власну частоту резонаторів із трубками дрейфу лінійного прискорювача ІЯД РАН. Розглянуто способи підвищення якості системи за рахунком оптимального вибору параметрів ПІ-регулятора й виконавчих органів системи – електронагрівника й клапана технічної води на вході теплообмінника. Намічено шляхи модернізації системи з використанням промислових мікропроцесорних регуляторів, що використовують широтно-імпульсну модуляцію як керуючий вплив.