



## Модельно-ориентированное проектирование атомного стандарта частоты

В качестве [«Куратора проекта»](#) инженеры ЦИТМ Экспонента организовали разработку системной модели атомного стандарта частоты для гражданского спутника.

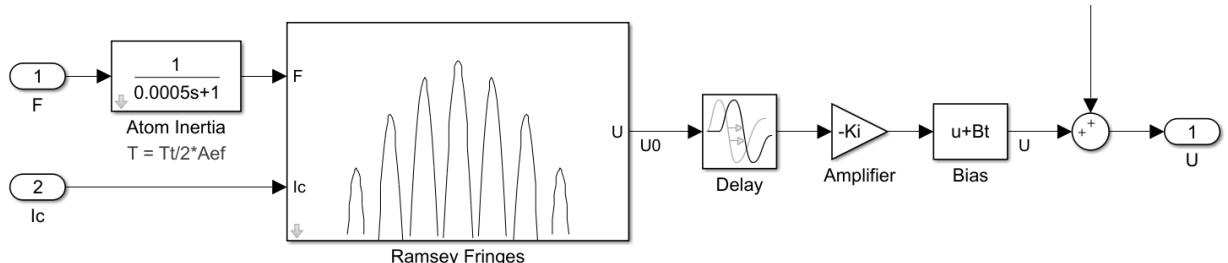
Мы подключились к проекту, когда заказчиком уже были созданы прототипы устройства, но без моделирования не удавалось качественно настроить систему управления. Заказчик обратился к нам чтобы совместно смоделировать физику атомной трубки и разработать систему управления с последующей реализацией на отечественной элементной базе.

### Задача

Разработка системы управления атомного стандарта частоты и её реализация на российской элементной базе.

### Решение

Работу мы начали с моделирования в Simulink основного компонента системы – атомно-лучевой трубы (АЛТ). Была создана модель, описывающая АЧХ трубы с учетом эффекта Зеемана – расщепления резонансного пика под действием внешнего магнитного поля.



Модель спектра Зеемана АЛТ

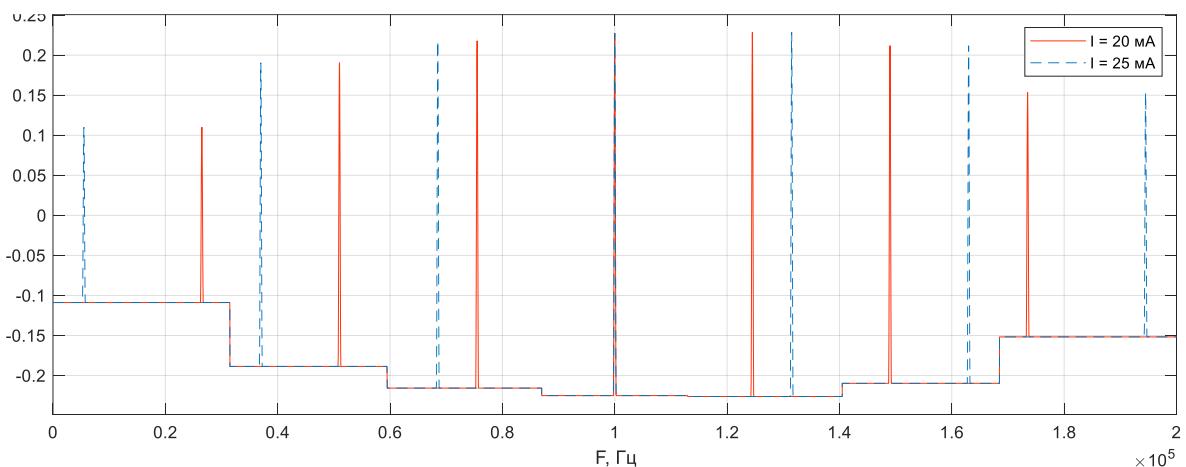


Рис. 1. Эффект Зеемана в модели АЛТ при разных значениях тока источника магнитного поля

Параметры модели АЛТ были уточнены по экспериментальным данным – снятой с прототипа трубки частотной характеристики. Для этого сначала средствами MATLAB экспериментальный сигнал был предобработан и очищен от шумов, а затем с помощью встроенных в MATLAB алгоритмов анализа данных были выделены частоты резонансных пиков и соответствующие им амплитуды.

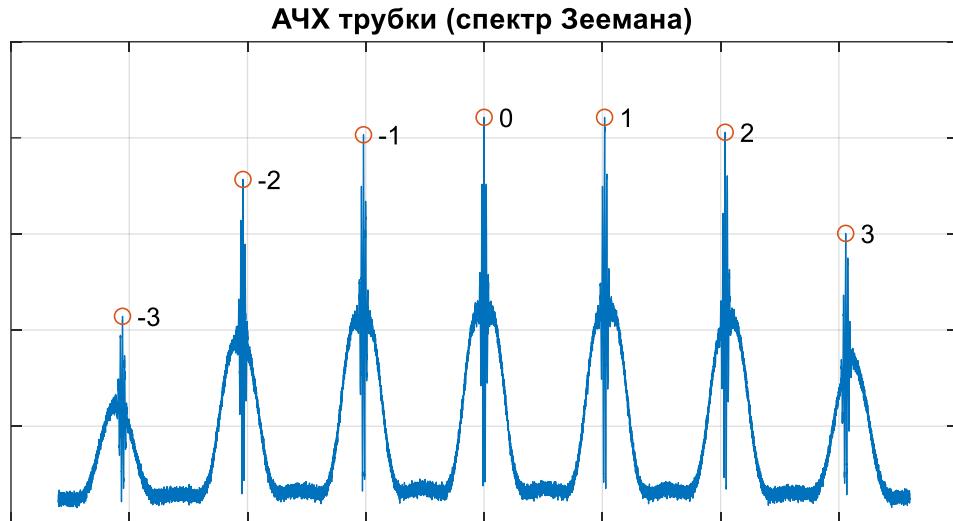


Рис. 2. Экспериментально полученная предварительно обработанная частотная характеристика АЛТ

Затем параметры Simulink-модели АЛТ были подобраны с помощью инструмента Simulink Design Optimization. Модель была оптимизирована таким образом, чтобы все резонансные пики АЛТ соответствовали реальной частотной характеристике.

Исходя из архитектуры прототипа была создана системная модель стандарта частоты с учетом уже реализованных алгоритмов.

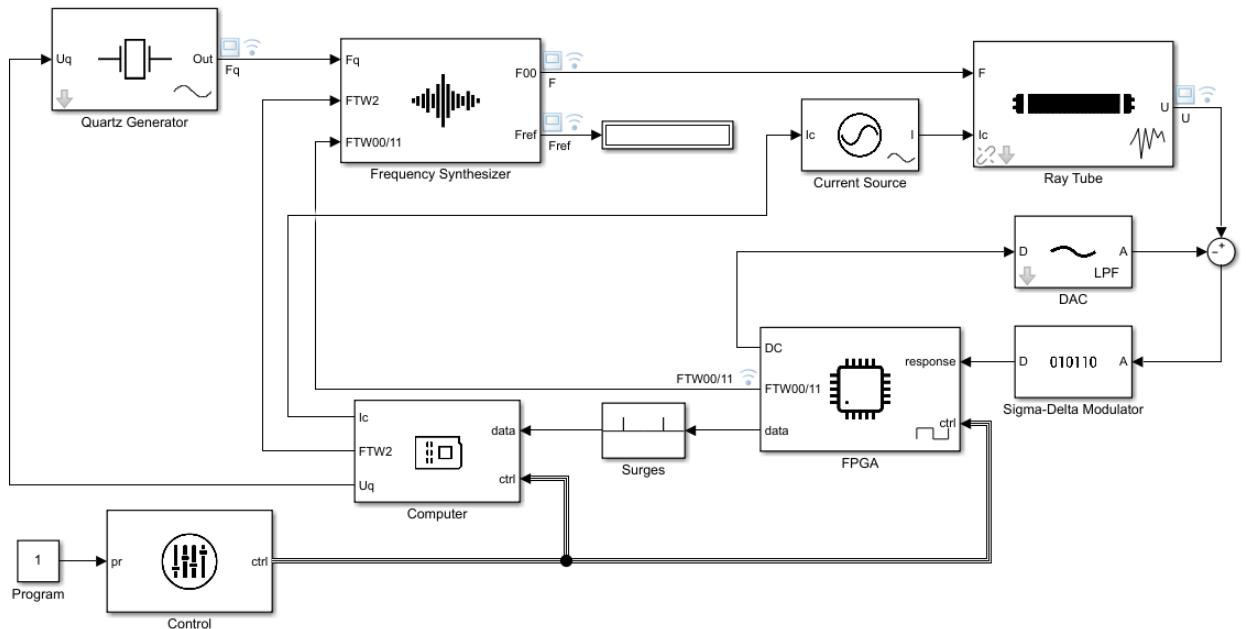


Рис. 3. Системная модель атомного стандарта частоты

У построенной системной модели несколько назначений:

- разработка и отладка системы управления
- тестирование и донастройка системы управления с учетом шумов и других неидеальностей

Для удобного управления моделью, обеспечения возможности включать/отключать разные типы неидеальностей, разрывать/замыкать контуры обратной связи прямо в модели реализована панель управления конфигурацией.

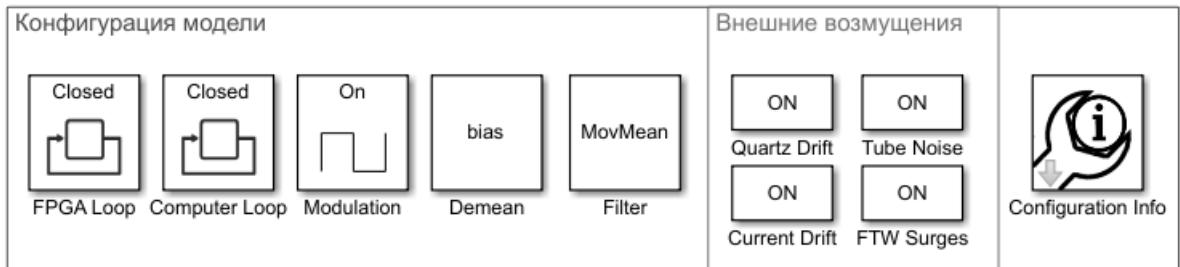


Рис. 4. Управления конфигурацией системной модели

Построенная модель получилась существенно нелинейной за счет алгоритмов обработки высокочастотных сигналов с АЛТ. Поэтому для возможности настройки САУ верхнего уровня с помощью автоматизированных инструментов идентификации было получено семейство линейных передаточных функций, описывающих поведение системы в разных рабочих точках. Затем по этим линейным характеристикам мы настроили двухконтурную систему управления на основе интегральных регуляторов с помощью пакета Simulink Control Design.

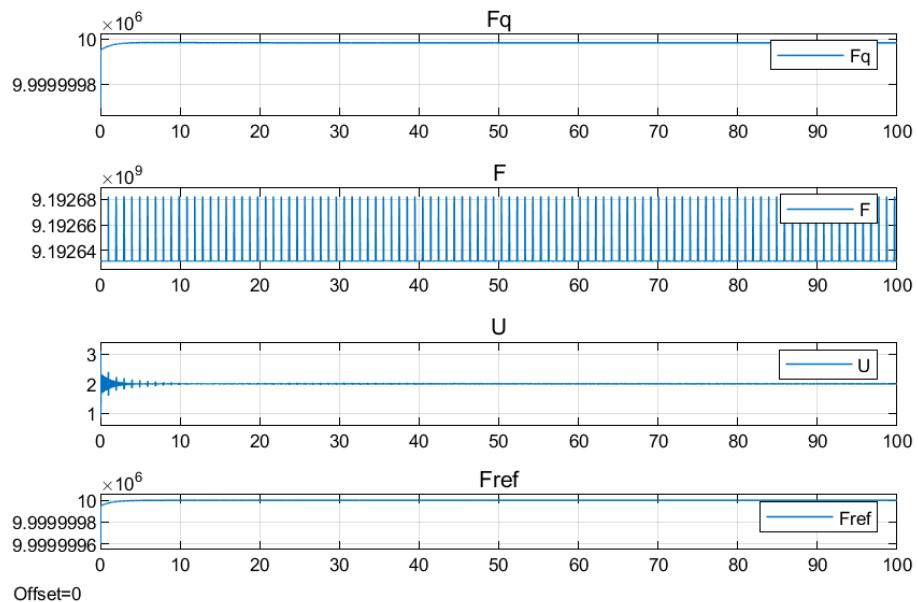


Рис. 5. Результат работы системной модели – отработка внешних возмущений.  
Нижний график – выходная частота стандарта

Отдельно стояла задача эффективно фильтровать шумы в обратной связи, возникающие в АЛТ и нарушающие устойчивость всего замкнутого контура. Для этого было разработано несколько цифровых фильтров, в том числе адаптивный фильтра Калмана и рекурсивный алгоритм оценки сигнала на основе метода наименьших квадратов. Для фильтрации выбросов использован медианный фильтр из пакета DSP System Toolbox.

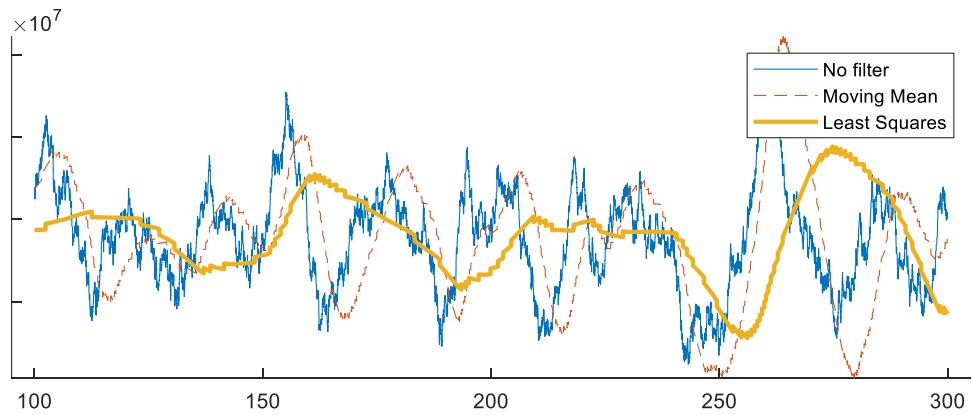


Рис. 6. Сравнение разных алгоритмов фильтрации

На последнем этапе проекта из настроенного алгоритма управления был генерирован С код для платы NeuroMatrix производства НТЦ «Модуль» с помощью пакета поддержки РИТМ: Встраиваемые системы для NeuroMatrix. Помимо самого алгоритма на плате также запускается графический интерфейс управления стандартом частоты, генерированный с помощью того же пакета поддержки из Simulink.



Рис. 7. Разработанный графический интерфейс для управления алгоритмом непосредственно на NeuroMatrix с помощью сенсорной панели

Все созданные модели Simulink, скрипты MATLAB, экспериментальные данные и другие артефакты структурированы и оформлены в виде проекта MATLAB с поддержкой командной работы через систему контроля версий Git.

Каждый этап разработки задокументирован и содержит интерактивные инструкции по выполнению основных задач, таких как обработка экспериментальных данных, оптимизация модели трубы, линеаризация системы, настройка САУ и др.

В рамках проекта создана библиотека блоков Simulink, описывающих основные компоненты стандарта частоты. На их основе созданы и протестированы еще несколько системных моделей перспективного варианта устройства. Исследование и симуляция

некоторых из них показали принципиальные проблемы в реализации еще до создания прототипов.

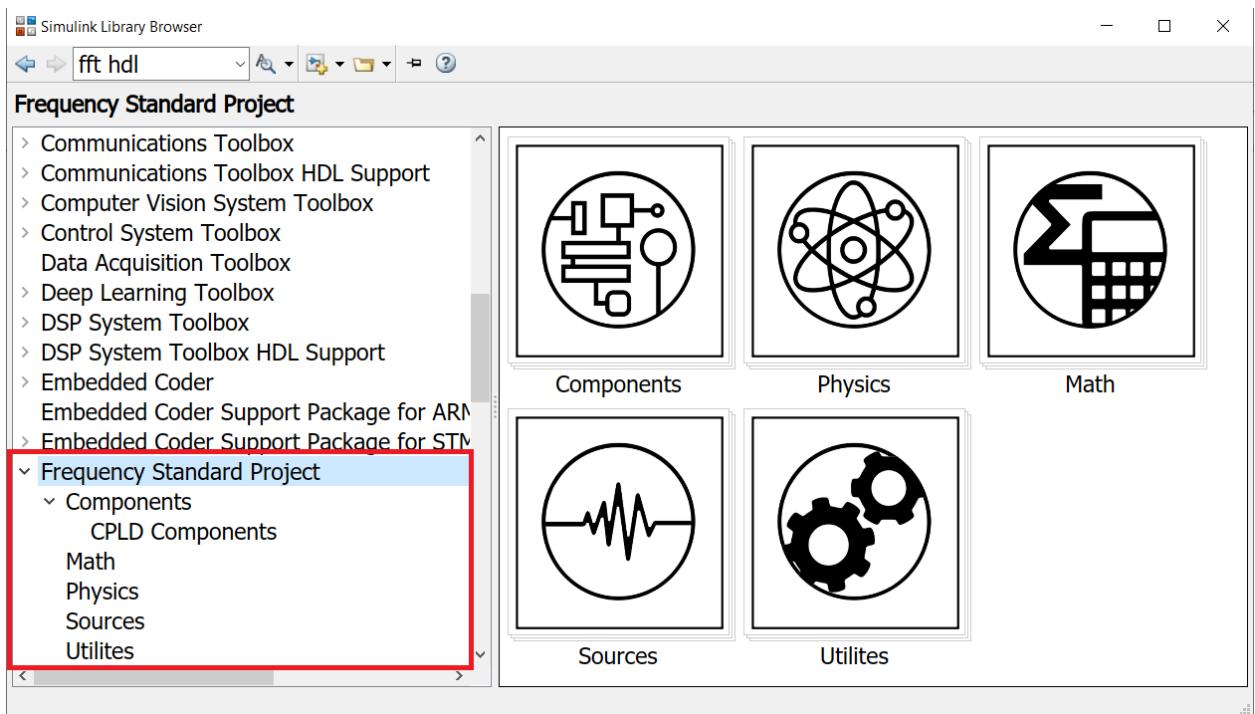


Рис. 8. Библиотека блоков атомного стандарта частоты

## Результаты

Главным результатом является настроенная и отлаженная по модели система управления атомного стандарта частоты. Благодаря построению системной модели удалось оптимально настроить регуляторы и разработать эффективные алгоритмы фильтрации шумов, т.е. решить задачи, которые без моделирования не решаются или решаются ограниченно.

Дополнительно были построены и проанализированы еще несколько вариантов системных моделей, анализ и симуляция которых позволили обнаружить принципиальные проблемы реализации без создания дорогостоящих прототипов.

Генерация кода из алгоритмов и моделей графического интерфейса сэкономила месяцы работы программистов и позволила раньше приступить к созданию прототипов на базе платы NeuroMatrix.

Инженеры одного из подразделений нашего заказчика оценили и освоили метод модельно-ориентированного проектирования и планируют расширять его применение в других проектах. Применение МОП на данном проекте позволило снизить трудозатраты до 30 рабочих дней.

## Использованные инструменты

- MATLAB
- Simulink
- Curve Fitting Toolbox
- System Identification Toolbox

- Optimization Toolbox
- Simulink Design Optimization
- Control System Toolbox
- Simulink Control Design
- Stateflow
- Signal Processing Toolbox
- DSP System Toolbox
- MATLAB Coder
- Simulink Coder
- Embedded Coder
- РИТМ: Встраиваемые системы для NeuroMatrix



**ЭКСПОНЕНТА**  
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Контакты**

[exponenta.ru](http://exponenta.ru)

E-mail: [info@exponenta.ru](mailto:info@exponenta.ru)

Тел.: +7 (495) 009 65 85

Адрес: 115088 г. Москва,

2-й Южнопортовый проезд, д. 31, стр. 4