

УДК 681.5.08

В.Ю. ЛАРИН¹, Д.Ш. КУМ-НАКШ²¹ *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*² *Донецкий национальный технический университет «ДонНТУ», Украина*

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА

В статье приведена методология проектирования прибора для прецизионного измерения температур в диапазоне от 0 °С до +200 °С. С помощью инженерно-вычислительного комплекса LabView построеной виртуальной модели, принципиальное решение автоматического ЯКР-термометра. Существующие в настоящее время приборы для измерения температур не обеспечивают требуемой точности и надежности, без которых немислим контроль и поддержание температуры, особенно в экстремальных условиях, например, в космических исследованиях, при проектировании интегральных микросхем, в томографах и т.п. процессах, где необходима высокая точность контроля температуры. Так как принцип действия предложенного прибора использует высоконадежный метод измерения на основе ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР), то решение данной проблемы является весьма актуальной.

Ключевые слова: ЯКР-термометра, LabView, виртуальная модель, прецизионное измерение температуры, интегральные микросхемы, контроль температуры, сверхрегенератор.

Введение

ЯКР-термометры основаны на взаимодействии градиента электрического поля кристаллической решетки и квадрупольного электрического момента ядра, вызванного отклонением распределения заряда ядра от сферической симметрии. Это взаимодействие обуславливает прецессию ядер, частота которой зависит от градиента электрического поля решетки, и для различных веществ имеет значения от сотен килогерц до тысяч мегагерц. Градиент электрического поля решетки зависит от температуры, и с повышением температуры частота ЯКР снижается. Датчик ЯКР-термометра представляет собой ампулу с веществом, заключенную внутри катушки индуктивности, включенной в контур генератора. При совпадении частоты генератора с частотой ЯКР вещества происходит поглощение энергии от генератора.

Принципы построения стабильных генераторных схем изложены в [1].

При использовании в качестве термометрического вещества гранулированного хлората калия KClO_3 , являющегося одновременно сердечником индуктивности, включенной в контур генератора, погрешность измерения температуры в пределах изменения от 0 °С до +200 °С уменьшается в пределах от $\pm 0,002$ °С, до $\pm 0,02$ °С.

Достоинством ЯКР-термометров является его неограниченная во времени стабильность, а недостатком – существенная нелинейность функции преобразования.

В настоящее время одной из функций космических кораблей является проведение химических анализов веществ в космосе. Для этой цели используются ЯКР спектрометры. Поскольку единственным недостатком ЯКР спектрометра является большая чувствительность к изменению температуры на доли градуса, он используется с датчиком температуры ЯКР, который является уникальным прибором для контроля температуры в ЯКР спектрометре.

Целью данной работы является построение автоматического ЯКР-термометра в указанных выше пределах измерения с использованием технологий быстрого проектирования, в частности инженерно-вычислительного комплекса LabView.

1. Экспериментальная часть

В последние годы метод ЯКР находит все большее применение в различной измерительной аппаратуре. На основе этого метода изготавливаются датчики температуры, магнитного поля, давления и т.д. Большая абсолютная точность измерения температуры $\approx 10^{-3}$ градуса делают их незаменимыми при прецизионных измерениях, а выход информации в виде частоты очень удобен для создания автоматических устройств.

Блок-схема ЯКР-термометра представлена на рис. 1. Датчиком температуры является сверхрегенеративный спектрометр с автоматическим слежением за центром линии поглощения, состоящий из собственно сверхрегенератора, полосовой фильтр,

компаратора, усилителя постоянного тока и генератора модулирующего напряжения.

К схеме, осуществляющей перевод сверхрегенератора в режим непрерывной генерации, и выводу информации на индикацию, относятся: одновибратор, буферный каскад, микропроцессор и индикатор.

ратора в режим непрерывной генерации, и выводу информации на индикацию, относятся: одновибратор, буферный каскад, микропроцессор и индикатор.

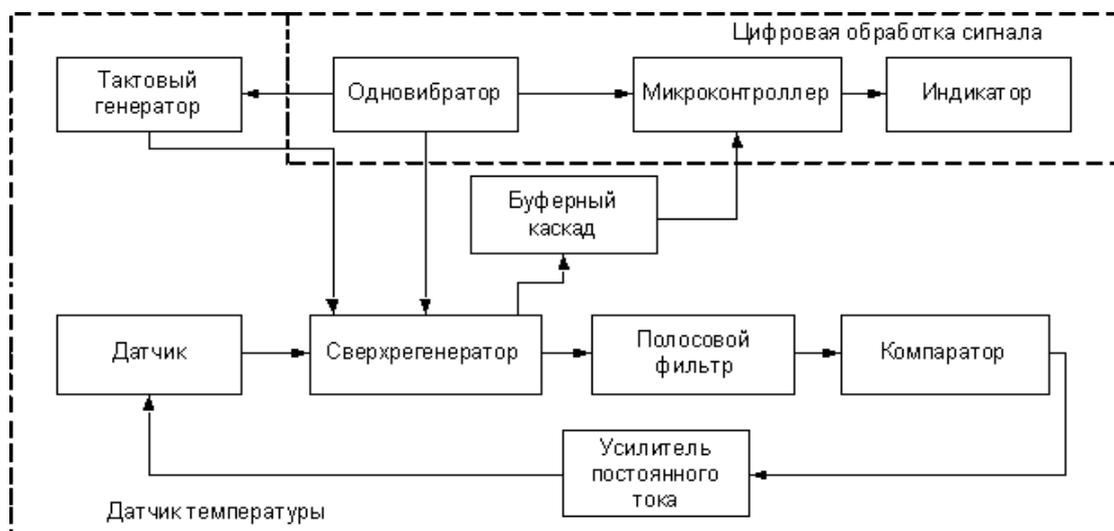


Рис. 1. Структурная схема автоматического ЯКР-термометра

Датчик температуры автоматически следит за резонансной частотой поглощения, зависящей от температуры рабочего вещества.

С выхода сверхрегенератора сигнал поглощения поступает на полосовой фильтр, а затем на компаратор. После компаратора напряжение, составляющее разницу напряжений входов компаратора, усиливается усилителем постоянного тока и по цепи обратной связи управляет системой слежения за резонансной частотой поглощения. Частота опроса датчика определяется одновибратором, колебания которого синхронизированы с генератором тактовой частоты. Пока не поступит импульс от одновибратора, работает генератор тактовой частоты и происходит настройка сверхрегенератора на частоту ядерного квадрупольного резонанса. При поступлении импульса от одновибратора работа тактового генератора останавливается, а сверхрегенератор переводится в режим непрерывной генерации. Сигнал от сверхрегенератора через буферный каскад, состоящий из эмиттерного повторителя и делителя частоты, поступает на микроконтроллер, пересчитывается в температуру и далее на индикацию. Частота принимаемого сигнала (частота ЯКР), $f_{ЯКР}$ от 26 МГц до 28 МГц. Температура, соответствующая максимальной и минимальной частоте, T от 20 °С до 183 °С. Уровень принимаемого сигнала на частоте ЯКР, $U_{ВЫХ}$ 0,5 мВ. Уровень шума, $U_{Ш}$ не более 100 мкВ.

Датчик ядерного квадрупольного резонанса принимает радиочастоты от термометрического вещества и передает сигнал на вход сверхрегенератора. Частота подстройки датчика варьируется при помощи варикапа, емкость которого изменяется при помощи сигнала, поступающего от усилителя по-

стоянного тока. Датчик подключается в коллекторную цепь сверхрегенератора.

Необходимо рассчитать емкости $C3$ и $C6$ и выбрать варикап (рис. 2), который должен настраивать датчик на резонансную частоту. Выбор варикапа производится из условий:

- варикап должен иметь диапазон изменения емкости, порядка 10 пФ;
- обратное напряжение варикапа, при максимальном значении емкости, не должно превышать напряжение питания ($U_{ПИТ} = 12 В$).

Выбираем варикап VD1 – BB405B.

Когда на вход сверхрегенератора поступает импульс от тактового генератора, на его выходе формируется сигнал в виде вспышки амплитудномодулированных колебаний. Частота появления вспышек равна частоте тактового генератора.

Сверхрегенератор представляет собой регенератор, у которого эквивалентное затухание контура медленно меняется, по сравнению с собственными колебаниями, причем на некоторых интервалах времени оно становится отрицательным, и регенератор переходит в режим самовозбуждения. На практике обычно эквивалентное затухание меняется со вспомогательной частотой F , которую называют частотой суперизации; она в несколько раз больше максимальной частоты модуляции и значительно меньше частоты сигнала и резонансного контура (примерно в 500...1000раз). Сверхрегенератор собран по классической схеме на биполярном транзисторе (рис. 2). Для расчета $L2$ и $C5$ запишем уравнение для эквивалентной добротности сверхрегенератора [2]:

$$Q_{\Theta} = \frac{\rho}{R_{П} + R_{ДОП} - K_{ПОС} \cdot S \cdot \rho}, \quad (1)$$

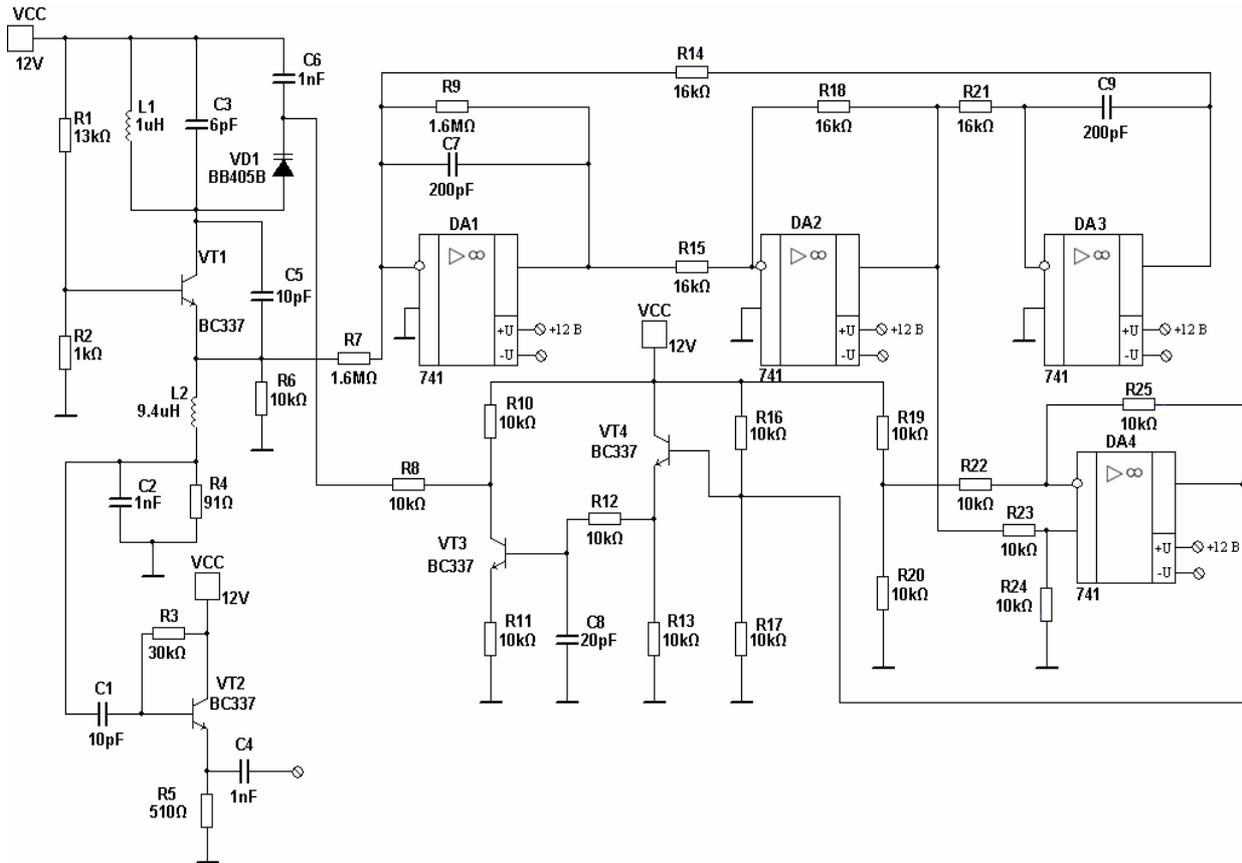


Рис. 2. Принципиальная схема автоматического ЯКР-термометра

где R_{π} – сопротивление потерь контура; $R_{доп}$ – дополнительное сопротивление контура; $K_{пос}$ – коэффициент передачи положительной обратной связи; S – крутизна характеристики транзистора в рабочей точке; ρ – характеристическое сопротивление контура датчика.

Знаменатель формулы имеет размерность сопротивления, Ом.

Когда знаменатель формулы равен нулю, S принимает некоторое критическое значение SKP и сверхрегенератор находится на границе самовозбуждения. В нашем случае знаменатель формулы эквивалентной добротности должен быть слегка больше нуля, чтобы сверхрегенератор находился на границе самовозбуждения. Когда на вход сверхрегенератора поступает импульс от тактового генератора, на его выходе формируется сигнал в виде вспышки амплитудомодулированных колебаний. Частота колебаний внутри вспышки равна частоте сигнала, поступающего от датчика (частота ядерного квадрупольного резонанса). Частота появления вспышек равна частоте тактового генератора. С выхода сверхрегенератора сигнал поглощения поступает на полосовой фильтр связано с необходимостью отфильтровывать основную гармонику сигнала поступающего от сверхрегенератора. В качестве активного фильтра лучше всего применить полосовой биквадратный фильтр 2-го порядка [3].

2. Моделирование автоматического ЯКР-термометра в среде LabView

В LabVIEW содержатся встроенные шаблоны, называемые Виртуальными Приборами, в дальнейшем – ВП, содержащие виртуальные под-приборы (ВПД), функции, структуры и объекты лицевой панели, которые могут потребоваться при создании базовых приложений для выполнения различных измерений. На рис. 3 приведена схема моделирования автоматического ЯКР-термометра в среде LabView.

Моделирование сверхрегенератора. Сверхрегенератор в данной схеме является генератором частоты образца, которая, впоследствии, будет конвертирована в температуру. Моделирование начинается с помещения на блок-диаграмм экспресс-ВП Simulate Signal и назовем его «Сверхрегенератор». Устанавливаем нужные параметры генератора:

- Timing: Samples per second(Hz) – количество точек в секунду (Гц) = $1E+9$;
- Frequency(Hz) – частота = 2,28 МГц;
- Reset Signal: Reset phase, seed, and time stamps сброс сигнала в исходное положение (одиночный сигнал).

На лицевую панель устанавливаем терминал Vertical Pointer Slide Vertical Pointer Slide – терминал ввода величины, в данном случае температуры в гра-

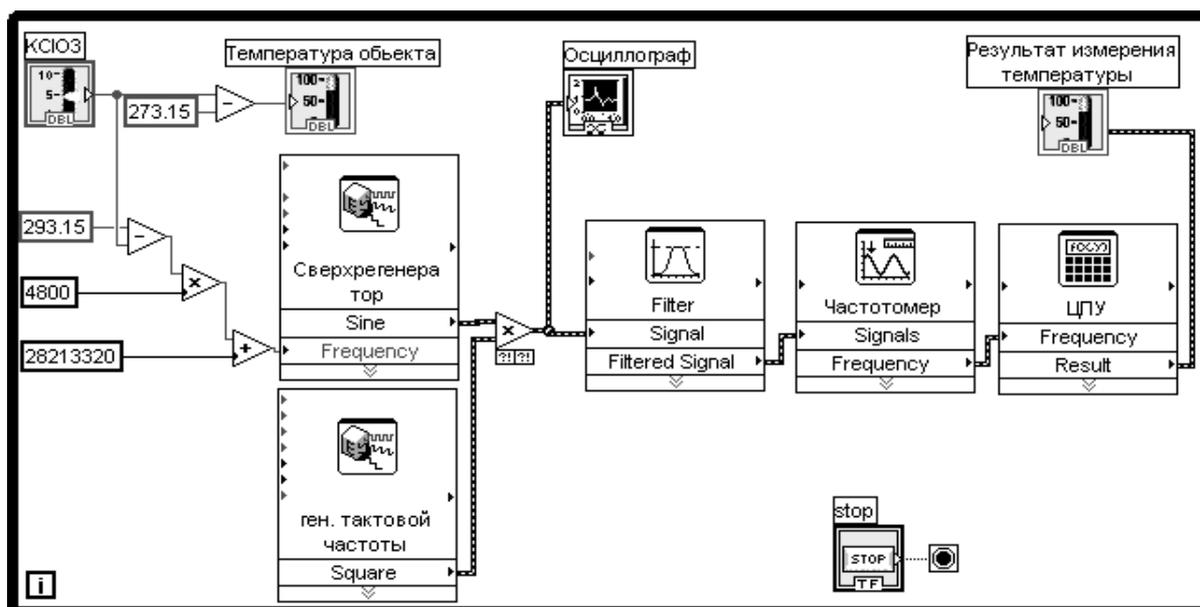


Рис. 3. Схема моделирования автоматического ЯКР-термометра в среде LabView

дусах Кельвина. Обозначим свойства терминала Vertical Pointer Slide:

- Appearance (внешний вид), введите название «Slide» для терминала Vertical Pointer Slide.
- Format and Precision устанавливается формат ввода значения «с плавающей точкой».
- Scale устанавливаем максимальное и минимальное значения диапазона значений вводимой величины.

Необходимо поставить терминал Thermometer. Этот терминал будет показывать температуру в градусах Цельсия. Для установления соответствия между градусами Цельсия и Кельвина используется терминал Subtract, на его вход подается Y – константа «273,15». Выходной сигнал от терминала Subtract подается на терминал Thermometer. Теперь необходимо задать частоту сверхрегенератора. Известно, что частота сверхрегенератора при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($293,15\text{ K}$) составляет 28213320 Гц, а на каждый градус Кельвина приходится 4800 Гц. При помощи сумматора и множителя мы формируем сигнал частоты сверхрегенератора. Добавим терминал Subtract, сумматор Add и множитель Multiply на блок-диаграмм для формирования сигнала частоты. На вход X терминала Subtract подаем константу «293,15» на вход Y – сигнал от терминала Vertical Pointer Slide. Выход терминала Subtract соединяем со входом X терминала Multiply, на вход Y подаем константу «4800». Соединяем выход терминала Multiply со входом X терминала Add, а на вход Y – константу частоты при температуре $293,15\text{ K}$ равную 28213320 Гц. Соединяем выход терминала Add со входом Frequency экспресс-ВП Simulate Signal «Сверхрегенератор».

Добавим еще один экспресс-ВП Simulate Signal и назовем его «Генератор тактовой частоты». Для того, чтобы синхронизировать сигналы от Сверхрегенератора и генератора тактовой частоты, необходимо соединить выходной сигнал генератора тактовой частоты со входом Reset Signal Сверхрегенератора. Таким образом, два сигнала будут иметь одинаковые начальные фазы.

Моделирование частотомера. В пакете прикладных программ LabView версии 8.x существует готовый экспресс-ВП Tone Measurements, который включает в себя функции частотомера, амплитудометра и фазометра (в версиях старше 8.x такого экспресс-ВП нет). Сразу после установки экспресс-ВП Tone Measurements на блок-диаграмм появляется окно конфигурирования. Переставим галочку с параметра Amplitude на параметр Frequency в области Signal Tone Measurements, теперь этот экспресс-ВП является не амплитудометром, а частотомером. Назовем этот экспресс-ВП «Частотомер».

Заключение

Испытания ЯКР-термометра показали, что метод ЯКР может вполне конкурировать с другими способами измерения температуры, превосходя их по абсолютной точности измерения. Однако повышение точности измерения даже на порядок по разработанной методике нерационально, так как время счета при этом увеличивается также на порядок. Поэтому для уменьшения погрешности измерения необходимо либо переходить на ручной способ измерения частоты, либо сверхрегенератор переводить в регенеративный режим. В последнем случае удастся повысить

точность измерения до 0,002 градуса. Однако, в этом случае автоматическое устройство получается более сложным, так как приходится применять специальные меры для устранения паразитной амплитудной модуляции. Основным недостатком этого метода является невозможность измерения температуры выше 200 °С из-за плохой чувствительности регенератора. Обычные же сверхрегенераторы в принципе не позволяют производить прецизионные измерения из-за зависимости центральной и боковых компонент спектра ЯКР от частоты гашения, поэтому при использовании метода ЯКР для прецизионных измерений температур выше 200 °С необходимо использовать захваченный сверхрегенератор. Несмотря на то, что КСlO₃ широко используется в метрологических целях, его применение в диапазоне температур выше 300 °С связано с некоторыми затруднениями: температура разложения КСlO₃ 370 °С; при использовании КСlO₃ следует учитывать его токсичность и взрывоопасность. Кроме того, температурная зависимость

частоты ЯКР ³⁵Сl в КСlO₃ носит нелинейный характер. Исследование целого ряда соединений с целью улучшения рабочих характеристик импульсного ЯКР-термометра позволяет нам предложить в качестве рабочего тела датчика кристаллы закиси меди - Сu₂O. Методика наблюдения сигнала позволила провести исследование температурной зависимости частоты ЯКР ⁶³Сu до 600 °С.

Литература

1. Ларин В.Ю. Основы построения приборов и систем с ферро и ферримагнитными преобразователями / В.Ю. Ларин. – Д.: Вебер, 2007. – 365 с.
2. Харинский А.А. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры / А.А. Харинский. – Л.: Энергия, 1971. – 464 с.
3. Амиров Р.З. Расчёт генератора синусоидального сигнала с мощным выходом / Р.З. Амиров, А.А. Кучеренко, А.А. Зори, В.И. Буркивченко. – Д.: Дон. нац. тех. ун-т. Вебер, 2002. – 87 с.

Поступила в редакцию 20.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры электронной техники Н.И. Чичикало, Донецкий национальный технический университет, Донецк.

МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЧНОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВІ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ

В.Ю. Ларін, Д.Ш. Кум-Накш

У статті приведена методологія проектування приладу для прецизійного вимірювання температур в діапазоні від 0°С до +200°С. За допомогою інженерно-обчислювального комплексу LabView побудована віртуальна модель та розроблено принципове рішення автоматичного ЯКР-термометра. Існуючі в даний час прилади для вимірювання температур не забезпечують необхідної точності і надійності, без яких неможливий контроль і підтримка температури, особливо в екстремальних умовах, наприклад, в космічних дослідженнях, при проектуванні інтегральних мікросхем, в томографах і т.п. процесах, де необхідна висока точність контролю температури. Оскільки принцип дії запропонованого приладу використовує високонадійний метод вимірювання на основі ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР), то вирішення даної проблеми є дуже актуальним.

Ключові слова: ЯКР-термометр, LabView, віртуальна модель, прецизійне вимірювання температури, інтегральні мікросхеми, контроль температури, сверхрегенератор.

AN METHODOLOGY OF CONSTRUCTION AUTOMATIC THERMOMETER NUCLEAR ON THE BASIS QUADRUPOLE RESONANCE

V.J. Larin, D.Sh. Kum-Nakesh

In the article, methodology of planning a device for exactness of measuring temperatures in a range from 0°С to +200°С. By the engineering-calculable complex of the LabView built virtual model, of principle decision of automatic NQR-thermometer. Devices existing presently for measuring temperatures do not provide the required exactness and reliability, which the control and maintenance of temperature is unthinkable without, special in extreme terms, for example, in space researches, at planning of integral microcircuits, etc. processes, where high exactness of control temperature is needed. Because principle of action of the offered device uses the method of measuring on the basis of nuclear quadrupole resonance (NQR) that decision of this problem is very actual.

Key words: NQR-thermometer, LabView, virtual model, exactness measuring of temperature, integral microcircuits, control of temperature, supergenerator.

Ларин Виталий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры аэронавигационных систем Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Кум-Накш Дулшер Шеро – магистрант кафедры электронной техники, Донецкий национальный технический университет «ДонНТУ», Донецк, Украина, e-mail: Dulsher@gmail.com.