

**Борисов Владислав Александрович**  
обучающийся, Ангарский государственный технический университет  
**Мазур Владимир Геннадьевич**  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет  
**Пудалов Алексей Дмитриевич**  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет  
e-mail: puddim@rambler.ru

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**  
Borisov V.A., Mazur V.G., Poudalov A.D.  
**USE OF SCHEMOTECHNICAL MODELING IN DESIGN OF ELECTRONIC  
DEVICES**

**Аннотация.** На примере генераторов синусоидальных сигналов показана необходимость использования схемотехнического моделирования при проектировании измерительных устройств. Приведены результаты моделирования генераторов Буббы и Батлера в программных пакетах National Instruments Multisim, Labcenter Electronics Proteus и Cadence PSpice 16.5. Показаны результаты расчетов параметров кварцевых резонаторов, используемых для стабилизации частоты генераторов.

**Ключевые слова:** схемотехника, моделирование, проектирование, генератор синусоидального сигнала, программное обеспечение, кварцевый резонатор.

**Abstract.** Using sinusoidal signal generators as an example, the necessity of using circuit simulation in the design of measuring devices is shown. The simulation results of the Bubba and Butler generators in the National Instruments Multisim, Labcenter Electronics Proteus, and Cadence PSpice 16.5 software packages are presented. The results of calculating the parameters of quartz resonators used to stabilize the frequency of oscillators are shown.

**Keywords:** circuitry, modeling, designing, sinusoidal signal generator, software, quartz resonator.

Схемотехническое проектирование блоков измерительных устройств зачастую связано с разработкой схемы генераторов синусоидальных напряжений [1, 2]. В связи с тем, что генераторы в таких устройствах наиболее сложны, с точки зрения расчетов, то зачастую проектировщики прибегают к программному моделированию основных узлов этих генераторов. Такой подход значительно сокращает время проектирования и позволяет подобрать наиболее оптимальные номиналы и разброс параметров радиоэлементов, входящих в схемы генераторов [3, 4].

Настоящая статья посвящена схемотехническому моделированию генераторов синусоидальных напряжений в наиболее популярных специализированных программных пакетах, таких как National Instruments Multisim 12.0, Labcenter Electronics Proteus 8.0, Cadence PSpice 16.5.

Низкочастотный генератор – генератор Буббы, часто используемый в схемах измерения статической емкости, был промоделирован в программе Na-

tional Instruments Multisim 12.0. Модель счетверенного операционного усилителя MC33079D присутствует в библиотеке компонентов данной программы, поэтому использовалась именно она. Низкочастотный генератор обычно является выносной частью какого-либо измерительного прибора и подключается к разъему XS1. Это позволяет легко настроить, откалибровать или заменить его на любой другой, соответствующий определенным требованиям:

- частота должна лежать в диапазоне от 3 МГц до 1 МГц;
- амплитуда должна лежать в пределах 1...2 В.

Схема генератора Буббы приведена на рисунке 1. Этот генератор работает на принципе сдвига фаз. В нем используется выгода от применения счетверенного операционного усилителя. Четыре RC звена требуют фазовый сдвиг в  $45^\circ$  в каждом звене, так что этот генератор имеет крутую фазовую характеристику, что приводит к минимальному дрейфу частоты. Каждая из RC секций вносит фазовый сдвиг в  $45^\circ$ , поэтому снимая сигнал с разных звеньев можно получить низкоомный квадратурный выход.

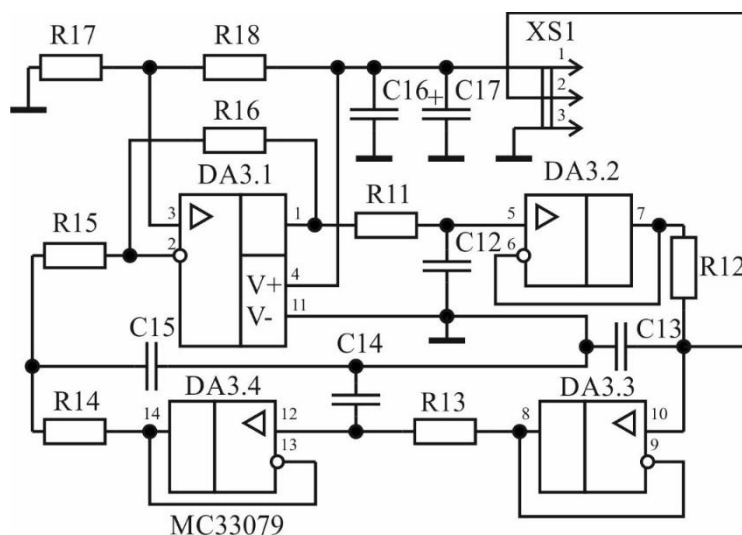


Рисунок 1 – Низкочастотный генератор Буббы

За счет использования четырех операционных усилителей в одной интегральной схеме повышается устойчивость частоты к изменениям температуры, питающего напряжения за счет максимальной идентичности параметров усилителей.

На рисунке 2 представлена исследуемая схема, спроектированная в программе Multisim.

Напряжение питания задавалось идеальным источником напряжения V1, поэтому фильтрующие конденсаторы были исключены из схемы. Напряжение половины питания на инвертирующем входе первого операционного усилителя так же задавалось источником напряжения без использования делителя. Допуски на номиналы всех элементов цепи были повышены в целях исследования

на стабильность генератора. К выходу генератора подключены триггеры Шмитта, преобразующие выходной синусоидальный сигнал в прямоугольный. С помощью виртуального осциллографа XSC1 наблюдалось напряжение на выходе генератора и на выходе триггеров Шмитта. Осциллограммы этих напряжений приведены на рисунке 3.

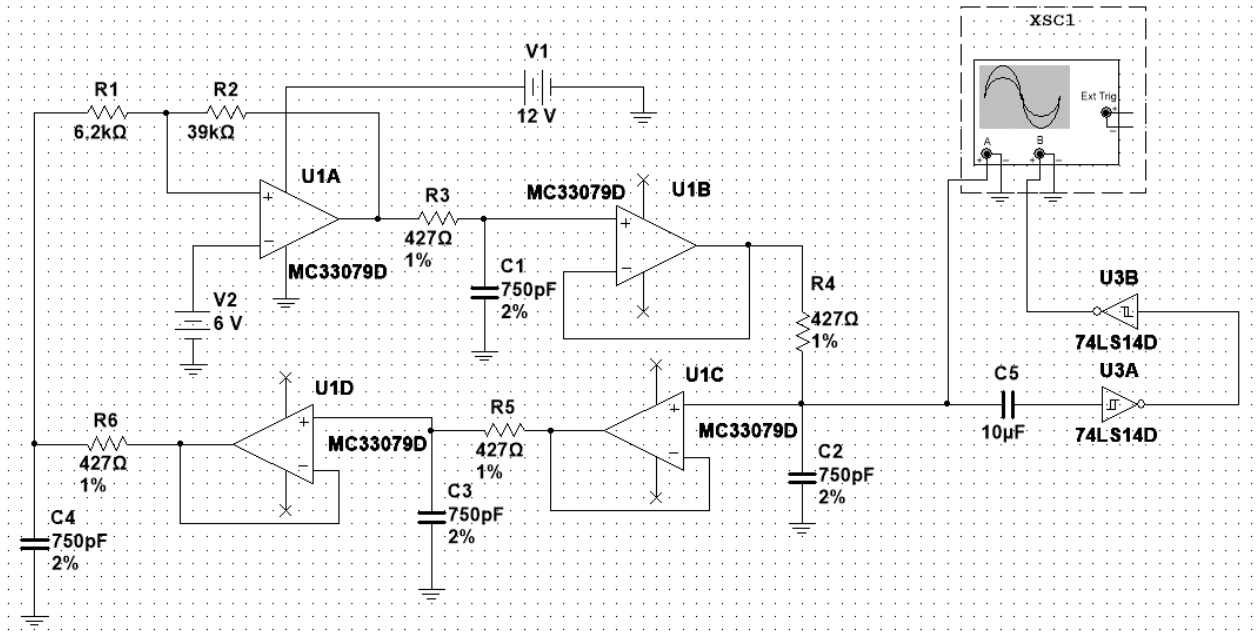


Рисунок 2 – Модель схемы генератора Буббы в программе Multisim

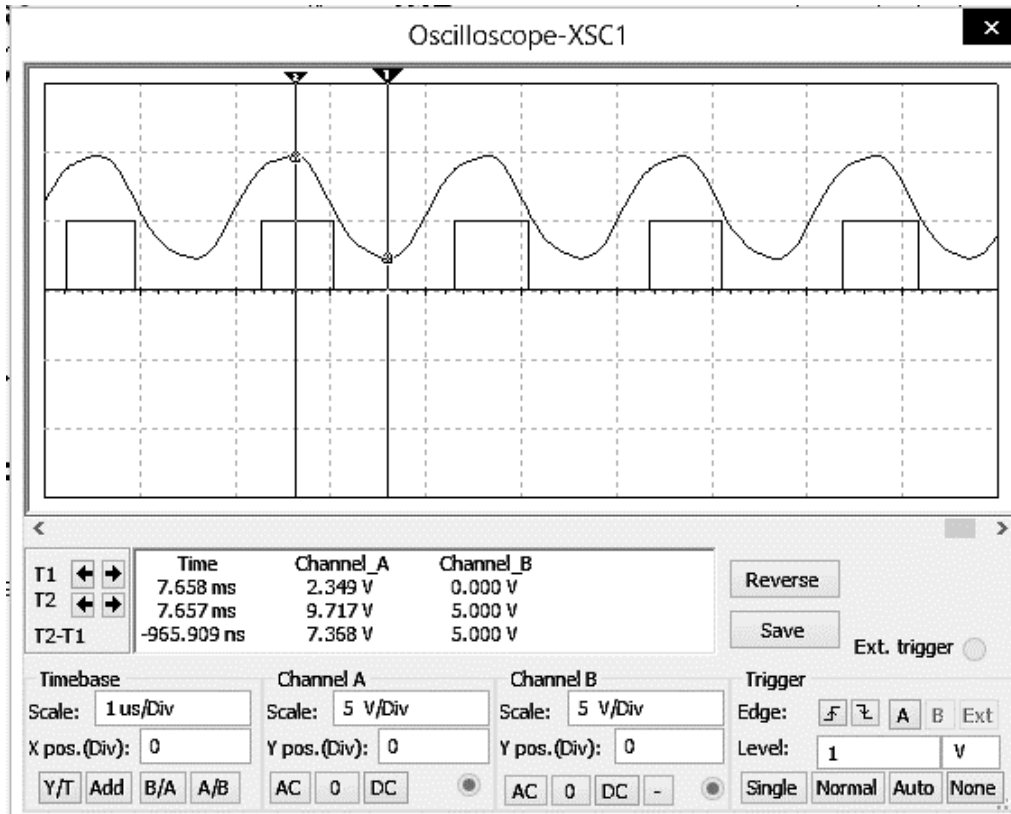


Рисунок 3 – Осциллограммы на выходе генератора и триггеров Шмитта

Результаты моделирования данной схемы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты работы модели генератора Буббы

Параметр	Значение	Единицы измерения
Размах выходного сигнала	7,368	В
Постоянная составляющая выходного сигнала	6,033	В
Амплитуда выходного сигнала	3,684	В
Период выходного сигнала (между максимумами сигнала)	2,042	мкс
Частота выходного сигнала	48971	Гц
Расчетная частота	49697	Гц
Относительная погрешность частоты	1,46	%

Данная схема показала хорошие результаты даже с завышенными допусками на номиналы элементов. Схема практически не нуждается в подстройке и наладке.

В схемах генераторов с повышенными требованиями к стабильности частоты генерируемого сигнала часто применяются кварцевые резонаторы [5-8]. Так как кварцевый генератор (КГ), выполненный по схеме Батлера, построен на биполярных транзисторах, моделирование производилось в программе Cadance PSpice, т.к. она имеет наибольшую сходимость с работой реальных устройств на дискретных элементах (рисунок 4).

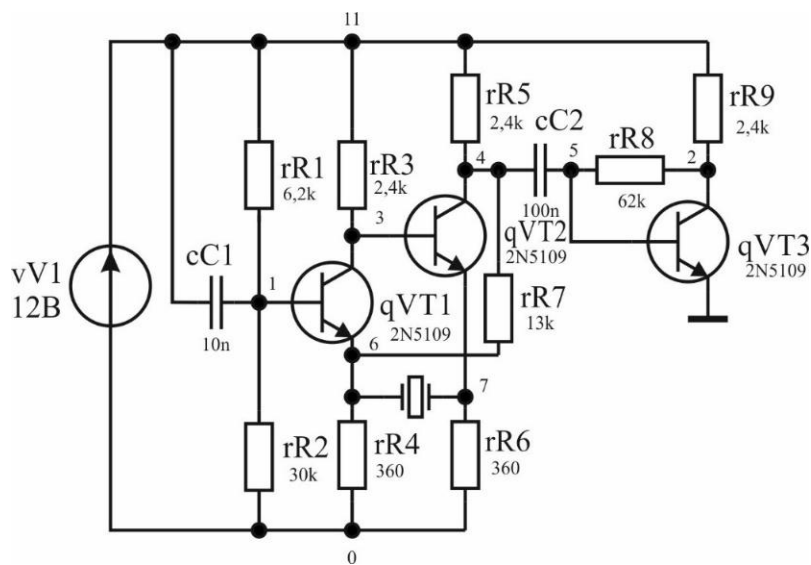


Рисунок 4 – Модель схемы кварцевого генератора в программе Multisim

Кварцевый резонатор, использованный в схеме генератора, эквивалентен электрической цепи, представляющей собой последовательную колебательную цепь, состоящую из элементов  $R_k$ ,  $C_k$  и  $L_k$ , зашунтированную емкостью  $C_0$ . Эквивалентная схема кварцевого резонатора показана на рисунке 5.

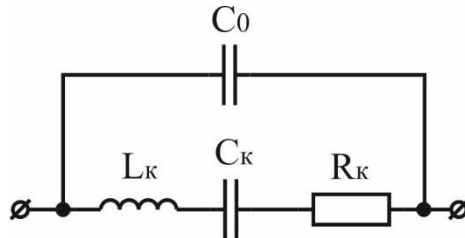


Рисунок 5 – Эквивалентная схема кварцевого резонатора

На эквивалентной схеме кварцевого резонатора (рисунок 5):

- динамическое сопротивление кварцевого резонатора  $R_k$  зависит от внутренних трений кварцевой пластины и источников других механических потерь, характеризует потери энергии при колебаниях электромеханической системы [9]. Для герметизированных пьезоэлектрических резонаторов с частотой резонанса 5...10 МГц динамическое сопротивление составляет не более 80 Ом [10];

- динамические индуктивность  $L_k$  и емкость  $C_k$  кварцевого резонатора определяются упругими, диэлектрическими и пьезоэлектрическими коэффициентами, зависят от среза, формы и размера пьезоэлемента. Динамическая индуктивность характеризует инерционность, а динамическая емкость характеризует упругие свойства пьезоэлектрика [9]. Для герметизированных пьезоэлектрических резонаторов с частотой резонанса 5...10 МГц динамическая индуктивность составляет порядка 0,003...0,035 Гн [10], а динамическая емкость – 0,015...0,1 пФ;

- параллельная емкость  $C_0$  характеризует емкость пластины и электродов кварцедержателя. В отличие от динамических параметров, практически не изменяется с частотой и может быть непосредственно измерена. Если воспрепятствовать колебаниям кварцевой пластины путем механического зажатия, то она превратится в конденсатор с емкостью  $C_0$ , которая будет определяться площадью пластины и расстоянием между электродами [11].

Из эквивалентной схемы кварцевого резонатора (рисунок 5) видно, что, при рассмотрении ее как колебательной системы, имеет место два резонанса – резонанс напряжений (последовательный резонанс) и резонанс токов (параллельный резонанс).

Полное сопротивление кварцевого резонатора на частотах ниже частоты последовательного резонанса носит емкостный характер, выше частоты последовательного резонанса – индуктивный. Последовательный резонанс кварцевого резонатора характеризуется максимальной амплитудой напряжения. Парал-

лельный резонанс кварцевого резонатора характеризуется минимальной амплитудой напряжения. При наступлении резонанса токов, сопротивление кварцевого резонатора велико (сотни кОм) и достигает своего максимума. Полное сопротивление носит индуктивный характер,

Работа генератора, представленного на рисунке 4, моделировалась на пяти частотах: 1, 3, 6, 9 и 20 МГц. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры моделей кварцевых резонаторов

Частота, МГц	$L_k$ , мГн	$C_k$ , пФ	$R_k$ , Ом	$C_0$ , пФ
1	67,4	0,37395	12	20
3	23,64	0,11895	10	18,8
6	10,33	$6,81 \times 10^{-2}$	15	23
9	8,033	$3,859 \times 10^{-2}$	11	21,84
20	4,488	$1,411 \times 10^{-2}$	36	17

Для примера на рисунках 5 и 6 показаны графики мгновенных выходных напряжений, построенные при разных моделях кварцевых резонаторов.

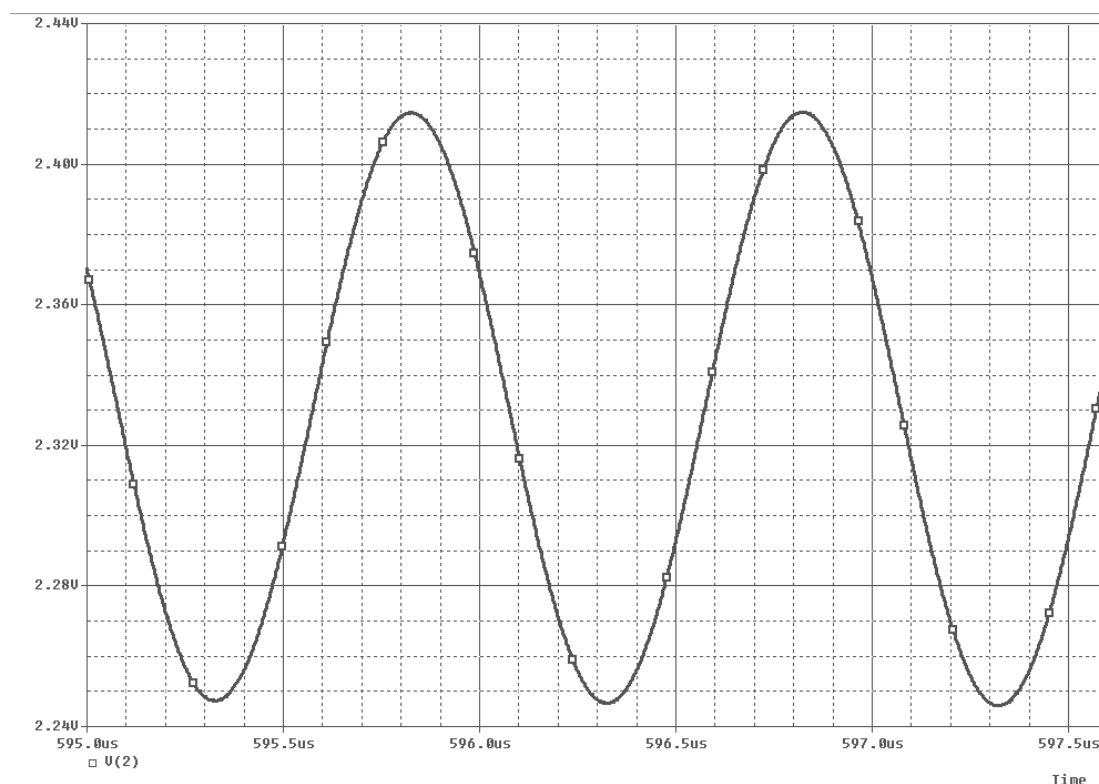


Рисунок 5 – График мгновенного напряжения на выходе КГ при частоте кварцевого резонатора 1 МГц

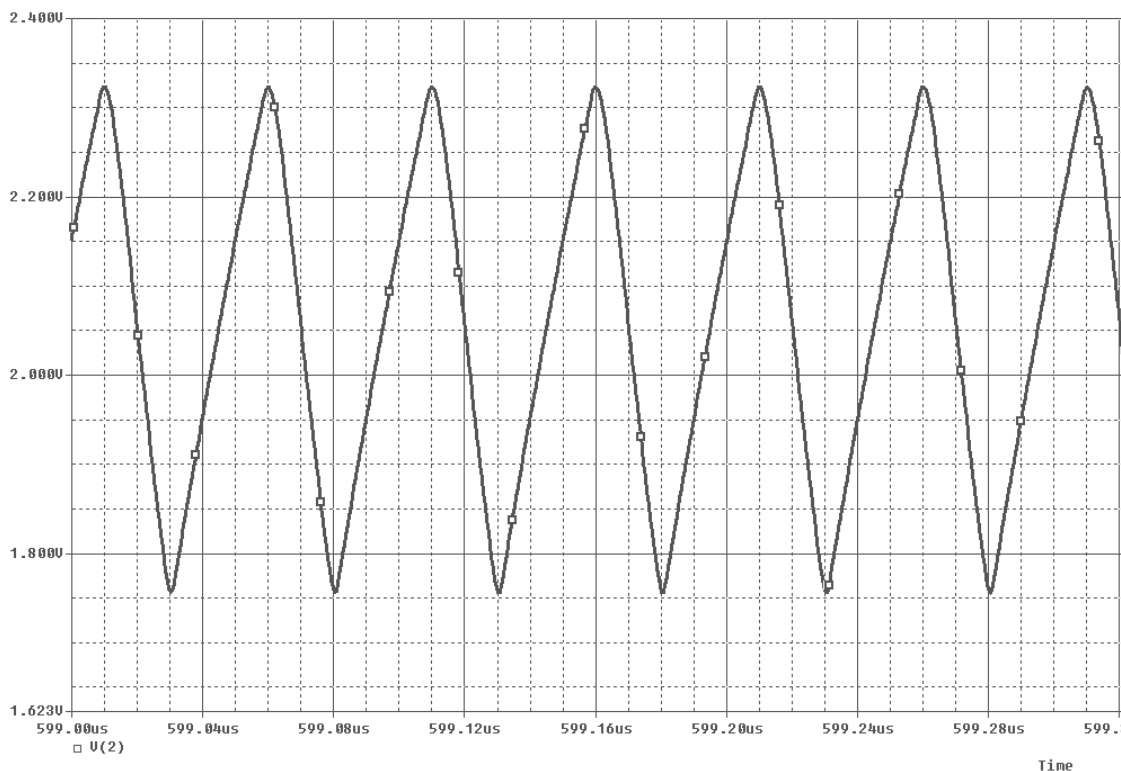


Рисунок 6 – График мгновенного напряжения на выходе КГ при частоте кварцевого резонатора 20 МГц

В таблице 3 приведены расчетные частоты выходных напряжений.

Таблица 3

Результаты работы модели кварцевого генератора

Период\частота на выходе генератора	Резонансная частота кварцевого генератора	Относительная погрешность частоты
966 нс\ 1,035 МГц	1,002 МГц	3,1 %
334 нс\ 2,994 МГц	3,001 МГц	2,3 %
168 нс\ 5,952 МГц	6,001 МГц	0,81 %
110 нс\ 9,090 МГц	9,039 МГц	0,56 %
50 нс\ 20,000 МГц	20,000 МГц	0 %

Формы напряжений на выходе кварцевых генераторов близки к синусоидальным. Генератор легко возбуждался на каждой исследуемой частоте, что говорит о правильности выбора схемы генератора и расчета элементной базы.

В связи с тем, что в схеме Батлера в качестве стабилизатора частоты использовался кварцевый резонатор различных резонансных частот, то для правильного выбора резонатора требовалось определить его параметры [12-16].

Моделирование блока вычисления таких параметров осуществлялось в программе Labcenter Electronics Proteus. Основой блока вычислений является микроконтроллер фирмы Atmel серии ATmega16.

На рисунке 7 приведена модель схемы блока вычислений параметров кварцевых резонаторов.

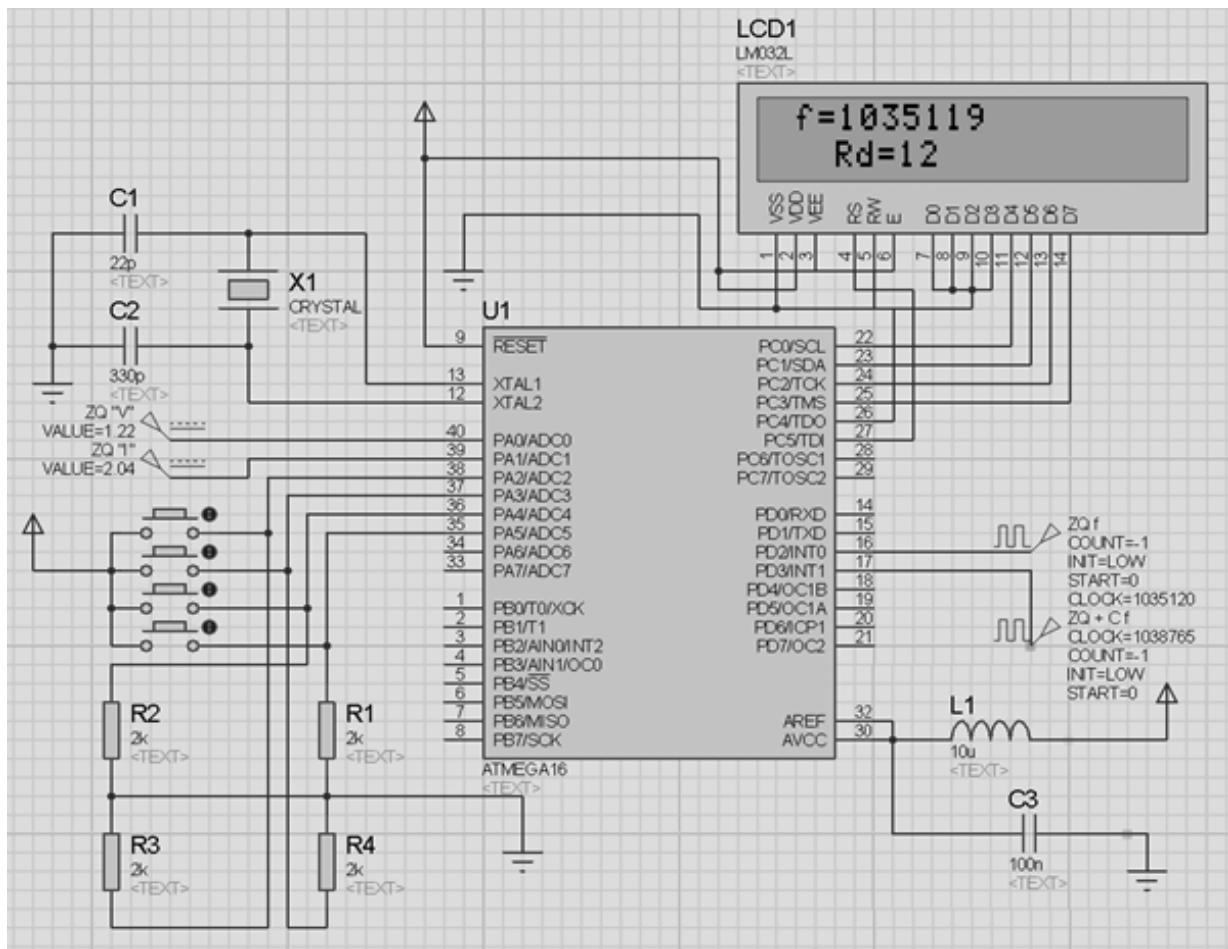


Рисунок 7 – Модель схемы блока вычислений в программе Proteus

В этой схеме все показания блока измерений были заменены на генераторы и источники напряжения с параметрами, эквивалентными измеренным. Так работа кварцевого генератора была заменена на два генератора прямоугольных импульсов: генератор частоты основного резонанса и генератор частоты при включении последовательно кварцевому резонатору емкости. Преобразователи напряжение-напряжение и напряжение-ток и выпрямители на их выходах были заменены источниками постоянного напряжения.

Частоты генераторов выбраны по таблице 4 для кварцевого резонатора 1 МГц. Параметры источников напряжения выбраны такими, чтобы задать активное сопротивление кварцевого резонатора 12 Ом.



Показания, выводимые на ЖК индикаторе модели схемы, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты работы модели блока вычислений

Параметр	Показание	Истинное значение	Единицы измерения
$C_0$	-	2	пФ
Основная частота	1035119	1035120	Гц
$R_k$	12	12	Ом
$L_k$	67,412	67,4	мГн
$C_k$	0,384	0,37395	пФ
$\Delta f$	3,096	-	кГц
$Q$	34916	34920	отн. ед.

Моделирование основных блоков принципиальной схемы измерителя эквивалентных параметров кварцевых резонаторов, таких как низкочастотный генератор и кварцевый генератор, подтвердило теоретические расчеты и выбор элементной базы. Расхождение расчетных частот и частот при моделировании не превысило  $\pm 3,2$  %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Применение сорбционно-частотного метода для измерения влажности неполярных органических жидкостей на примере бензола // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012» / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: МГТУ МИРЭА – ИРЭ РАН, 2012 часть 1. – С. 138–141.

2. Mazur V.G., Poudalov A.D. Measuring humidity of organic liquids in a wide concentration range of nondestructive testing // 13th international scientifictechnical conference on actual problems of electronic instrument engineering (apeie - 2016) – Novosibirsk, Proceedings: in 12 volumes, Volume 1, Part 1, 2016 – P 263 –266.

3. Мазур В.Г., Пудалов А.Д. Генератор первичного измерительного преобразователя сорбционно-частотного измерителя влажности органических жидкостей // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC– 2014», 1–5 декабря 2014 г., Москва. / Под ред. академика РАН А.С. Сигова. – М.: Энергоатомиздат, 2014, часть 4. – С. 142–145.

4. Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Разработка и исследование схемы генератора для пьезо-сорбционного чувствительного элемента // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. труд. XXVI Междунар. науч. конф.: в 2-х ч. Ч. 1./ под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов : Издательство СГТУ, 2013. – С. 64–68.

5. Липнин Ю. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Исследование динамических свойств широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности органических жидкостей // Измерительная техника. – 2014. – № 7. С. 65–68.

6. Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Первичный измерительный преобразователь для сорбционно-частотного влагомера органических жидкостей // Контроль. Диагностика. 2014. – № 11. – С. 9–13.

7. Воронова Т. С., Липнин Ю. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Исследование чувствительности широкодиапазонных пьезо-сорбционных влапочувствительных элементов для неразрушающего контроля органических растворителей // Измерительная техника. – 2017. – № 3. С. 65–68.

8. Воронова Т. С., Липнин Ю. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Исследование сорбционных покрытий пьезокварцевого резонатора с целью разработки приборов контроля органических примесей в газах // Измерительная техника. – 2019. – № 4. С. 67–71.

9. Грановская Р. А. Расчет кварцевых генераторов. Учебное пособие, - М., 1997 г. – 112 с.

10. Глюкман Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

11. Плонский А. Ф. Кварцевые резонаторы. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1954. – 102 с.

12. Кузнецов Р. О., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Автоматизированный измеритель эквивалентных параметров пьезо-сорбционных чувствительных элементов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. труд. XXVI Междунар. науч. конф.: в 2-х ч. Ч. 1./ под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов : Издательство СГТУ, 2013. – С. 233–236.

13. Справочник по кварцевым резонаторам, под ред. Позднякова П. Г. – М.: Связь, 1978. – 288 с.

14. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

15. Альтшуллер Г. Б. Кварцевые генераторы: справочное пособие. – М.: Радио и связь, 1984. – 232 с.

16. Марк Е. Хернитер. Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств, ДМК Пресс, 2006. – 492 с.