

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Трубач К.И., Романовский М.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванюк А.А. – доктор технических наук, профессор

Исследуется влияние температуры на кольцевые осцилляторы (КО) на FPGA Zynq-7010. Эксперименты подтверждают обратную зависимость между температурой и частотой КО. Модель зависимости — линейная функция с коэффициентом -301.0 , подтверждающая чувствительность КО к температуре.

Кольцевые осцилляторы (КО) применяются множеством способов (в качестве частей схем генерации случайных чисел, генераторов прямоугольных импульсов на системах без встроенного кварцевого генератора и др.) и обладают набором особенностей, к которым часто относят подверженность изменениям окружающей среды: температурным колебаниям или изменениям напряжения питания [1]. В некоторых случаях эти особенности имеют положительный характер (например, повышают качество генерируемых случайных последовательностей), в некоторых являются крайне нежелательными (например, при использовании КО как генератора синхронизирующих сигналов изменение выходной частоты может негативно сказаться на работе триггеров или всей схемы), поэтому часто важно понимать природу таких свойств и уметь их использовать. Целью настоящей работы было определено влияние температурного фактора на поведение КО, а также, как следствие, поиск математических закономерностей этого поведения.

Частота колебаний КО является одной из важнейших его характеристик, поэтому для достижения поставленной цели на плате быстрого прототипирования Zybo Z7 с FPGA Zynq-7010 был разработан дизайн, позволяющий проанализировать поведение нескольких КО на основе количества положительных фронтов, генерируемых ими за некое фиксированное время W . Схема этого дизайна на рисунке 1 для упрощения демонстрирует один КО, но легко расширяется до нужного количества осцилляторов.

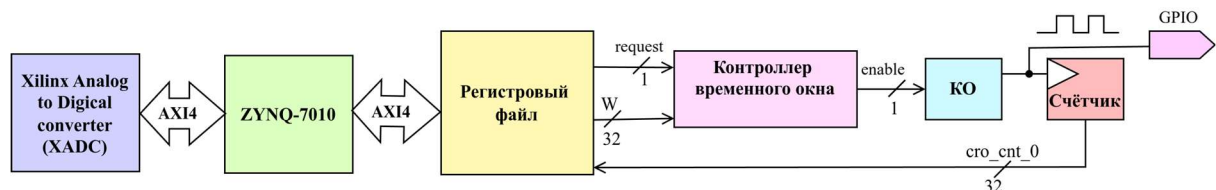


Рисунок 1 – Схема подсчёта количества положительных фронтов нескольких КО

КО, управляется сигналом *enable*. Контроллер временного окна активирует этот сигнал (*enable*=1) по запросу (*request*=1). По истечении W тактов, сигнал *enable* сбрасывается (*enable*=0), фиксируя значения счётчиков. Зафиксированные значения считываются через регистровый файл. Дополнительно схема включает IP-блок XADC для мониторинга температуры кристалла FPGA, а также порт GPIO, на который выводится сигнал КО для доступа осциллографа.

Исследование поведения КО с помощью описанной выше схемы проводилось в два этапа. Первый этап представлял собой трёхдневный тест платы в условиях обычной рабочей среды с колебаниями температуры воздуха (из-за присутствия людей и периодического проветривания). Температура воздуха составила $24.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$, а температура кристалла варьировалась от $+49^\circ\text{C}$ до $+54^\circ\text{C}$. Этот этап позволил оценить поведение схемы в неэкстремальных условиях и определить чувствительность кристалла FPGA к небольшим температурным флуктуациям. На втором этапе плата помещалась в термокамеру для поддержания стабильной температуры в диапазоне от -5°C до $+25^\circ\text{C}$. Это позволило установить зависимость между температурой и оценочной частотой КО. В обоих этапах использовалось значение $W = 10^6$ для минимизации влияния погрешностей на результаты измерений, хотя на практике можно использовать гораздо меньшие значения [2].

Результаты первого этапа представлены на рисунке 2, все значения на графике нормализованы для лучшей визуализации результата. Наблюдается обратная зависимость, как и предсказывает теория: при увеличении температуры максимальная частота работы схемы падает, а следовательно, количество зарегистрированных положительных фронтов КО уменьшается. Стоит отметить, что КО реагировали на относительно малые (до $\pm 0.2^\circ\text{C}$) изменения температуры кристалла FPGA. Это свойство может быть полезно при использовании предложенной схемы как части некой прикладной системы (цифрового термометра).

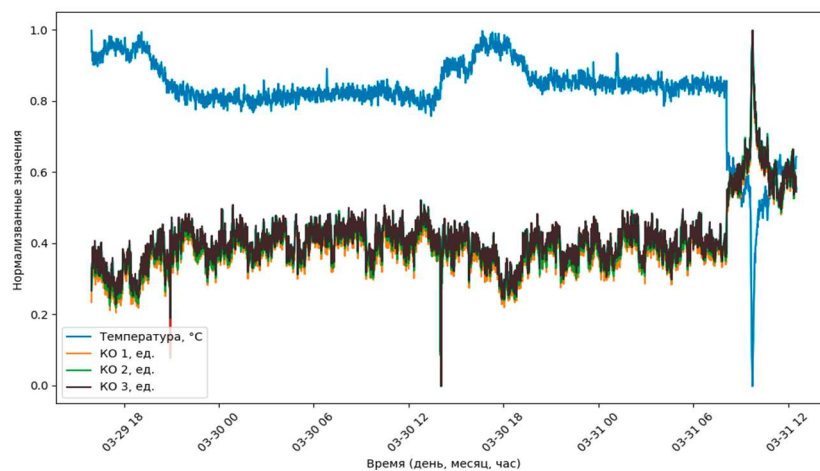


Рисунок 2 – Результат первого этапа оценки влияния температуры на поведение КО

Результаты второго этапа представлены на рисунке 3. Для каждой температурной точки после установления температурного равновесия собирались данные по среднему количеству положительных фронтов нескольких КО (КО 1 состоит из 20-ти LUT6, КО 2 — 40-ка, КО 3 — 80-ти), а также снимались фактические значения периода ещё одного КО (состоит из 20 LUT6) с помощью осциллографа RTB2002. Все КО были построены с использованием разного количества LUT6, однако располагались линейно и рядом. Несмотря на отличия в количестве LUT6 и в полученных значениях количества положительных фронтов, все КО имеют схожую тенденцию (с минимальными различиями, например, на отрицательных температурах, что, вероятно, обусловлено физической неклонируемостью КО [3]). При этом частота КО, измеренная осциллографом немного отличается от остальных, что наиболее вероятно объясняется искажением, вносимым GPIO. В итоге этот график подтверждает, что зависимость обусловлена именно чувствительностью КО, а не прочими факторами, такими как температурная деградация кварцевого генератора [4].

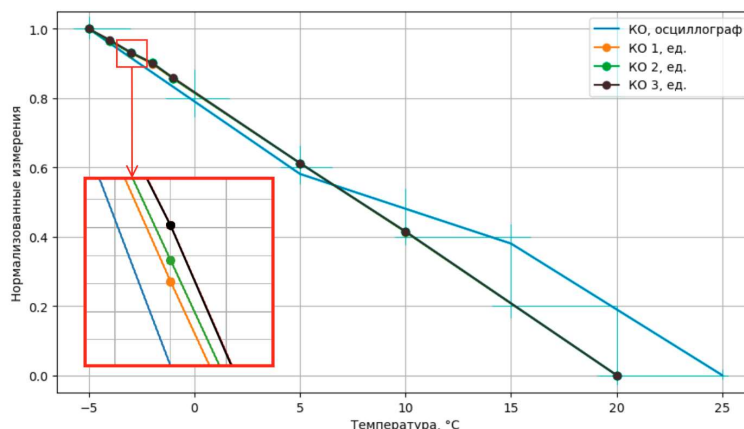


Рисунок 3 – Результат второго этапа оценки влияния температуры на поведение КО

Принимая, что отражённая на графике зависимость сводится к линейной функции вида $y=kx+b$ (y — количество положительных фронтов осциллятора, x — температура в градусах Цельсия, k — изменение количества фронтов за один градус, b — количество фронтов в нуле градусов), можно рассчитать k . Для настоящей работы он составил -301.0. В итоге экспериментально подтверждена обратная зависимость частоты КО от температуры, а полученный коэффициент линейной зависимости может быть использован как для прогнозирования поведения КО при некоторых условиях, так и для оценки температуры кристалла во время работы системы. Схема продемонстрировала высокую чувствительность КО к температурным условиям и в перспективе может быть использована в разработке термометров и анализаторов температурной стабильности систем на базе FPGA.

Список использованных источников:

1. Douadi A. et al. A study of high temperature effects on ring oscillator based physical unclonable functions //2023 IEEE 29th International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS). – IEEE, 2023. – С. 1-7.
2. Трубоч, К. И. Исследование точности измерения периода конфигурируемого кольцевого осциллятора / К. И. Трубоч, А. А. Иванюк // Информационные технологии и системы 2024 (ИТС 2024), Минск, 20 ноября 2024 г. / БГУИР ; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2024. – С. 95–96.
3. Иванюк, А. А. Реализация физически неклонируемой функции на LUT-блоках FPGA / А. А. Иванюк, С. С. Заливако // Информационные технологии и системы 2021 (ИТС 2021), Минск, 24 ноября 2021 г. / БГУИР ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2021. – С. 122–123.
4. Белов Л. Компоненты синтезаторов стабильной частоты – генераторы, управляемые напряжением // Электроника: НТБ. 2004. №1. С. 42-46.