

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

УДК 621.31

DOI 10.37493/2307-907X.2022.5.1

Звада Павел Александрович**КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Целью статьи является исследование возможности компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора интеллектуального электронного устройства при потере синхронизирующего сигнала от навигационного спутника. Разработан и реализован алгоритм программной компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора. Авторская реализация температурной компенсации кварцевых генераторов реализована в виде программы в среде LabView FPGA, протестирована в серии экспериментов с использованием двух контроллеров CompactRIO: эталонного и устройства с программной компенсацией. В результате применения компенсации удалось линеаризовать зависимость и снизить её со значений 0,65 такта на градус Цельсия до значений 0,04 такта на градус Цельсия для 200 МГц генератора. Данный способ компенсации не требует материальных затрат или изменения конструкции устройства измерения и готов к применению в большинстве измерительных устройств.

Ключевые слова: тактовый генератор, синхронизации измерений, fpga, компенсация погрешности.

Pavel Zvada**COMPENSATION OF THE TEMPERATURE INSTABILITY
OF THE QUARTZ GENERATOR OF THE INTELLIGENT ELECTRONIC DEVICE
FOR MEASURING ELECTRIC PARAMETERS**

The purpose of the article is to study the possibility of compensating for the temperature instability of the quartz oscillator of an intelligent electronic device in case of loss of a synchronizing signal from a navigation satellite. An algorithm for software compensation of the temperature instability of a quartz oscillator has been developed and implemented. The author's implementation of temperature compensation of quartz oscillators is implemented as a program in the LabView FPGA environment, tested in a series of experiments using two CompactRIO controllers: a reference one and a device with software compensation. As a result of applying compensation, it was possible to linearize the dependence and reduce it from 0,65 cycles per degree Celsius to 0.04 cycles per degree Celsius for a 200 MHz generator. This compensation method does not require material costs or changes in the design of the measuring device and is ready for use in most measuring devices.

Key words: clock generator, timing measurements, fpga, error compensation.

Введение / Introduction. Развитие и совершенствование управления энергосистемами на основе новых компьютерных и информационных технологий ориентируется на применение синхронизированных измерений векторных величин параметров электрического режима. Основной широкомасштабной измерительной системой в ЭЭС являются устройства синхронизированных

векторных измерений (УСВИ, или PMU – Phasor Measurement Unit). Документом, регламентирующим требования к характеристикам PMU в части точности измерения параметров электроэнергетического режима в стационарных и переходных режимах, является стандарт IEEE C37.118.1 [1]. Одно из требований стандарта – необходимость точной привязки результатов векторных измерений к астрономическому времени. Точность измерения параметров сети (амплитуды и фазы напряжений и токов, частота, действующие значения напряжений и токов) обеспечивается путём точной синхронизации внутренних часов PMU с сигналом от систем глобального позиционирования, в основном GPS и ГЛОНАСС. Однако из-за неконтролируемых внешних факторов окружающей среды, влияющих на приемники GPS, случается потеря сигнала от спутника. В таком случае отсчет времени измерительной системой MU выполняется на основе внутренних часов, как правило, базирующихся на тактовом генераторе. Поскольку тактовые генераторы предназначены именно для получения колебаний постоянной частоты, требования к ним очень четко стандартизированы и не допускается каких-либо отклонений в основных параметрах [2]. Однако в период эксплуатационной активности устройства измерения MU существует ряд факторов, влияющих на возникновение ошибок устройства из-за влияния внешних условий среды на тактовый генератор.

Цель данной статьи – изучить влияние потери сигнала GPS на точность измерения параметров сети, проверить возможность обеспечения синхронизации за счет частоты внутреннего кварцевого генератора PMU и изучить возможность повышения точности синхронизации с помощью температурной коррекции кварцевого генератора.

Синхронизация точного времени по GPS. Система глобального позиционирования (GPS) – спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение во всемирной системе координат WGS 84 [3]. Для полноценной навигации на высоте 20,2 тыс. км над Землей в шести плоскостях расположены 32 действующих спутника. Каждый из спутников оснащен атомными часами, которые синхронизируются с точностью до 1 нс [4]. GPS позволяет при любой погоде определить местоположение приемника по всему Земному шару всего с помощью 4 спутников, как только местоположение будет определено, для временной синхронизации потребуется только один GPS-спутник. Точность GPS-приемника для системы WAMS составляет не менее 250 нс [1].

Есть несколько факторов, влияющих на работу GPS:

- положение антенны приемника GPS: для корректной работы антенна должна иметь доступ к пространству без заграждений для беспрепятственного обзора спутников;
- влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат приемником сигнала от спутника геопозиционирования [5];
- ошибки позиционирования в несколько сотен метров при погрешностях фиксации времени на других платформах, обладающих высокой динамикой.

Материалы и методы / Materials and methods. В данной статье используются методы физического эксперимента, применялись методы сравнения, экспертных оценок, статистические, графического и табличного представления данных.

Согласно стандарту IEEE C37.118.2, ошибка синхронизации времени, равная 1 мкс, приводит к появлению дополнительной погрешности измерения фазового угла, равной $0,018^\circ$, а ошибка в регистрации фазового угла на $0,57^\circ$ – к превышению допустимой величины суммарной векторной погрешности (TVE) = 1 % [6]. Поэтому для эксперимента использовалось оборудование способное формировать сигнал с точной привязкой по фазе к времени UTC (< 1 мкс).

Блок-схема эксперимента отображена на рис. 1.

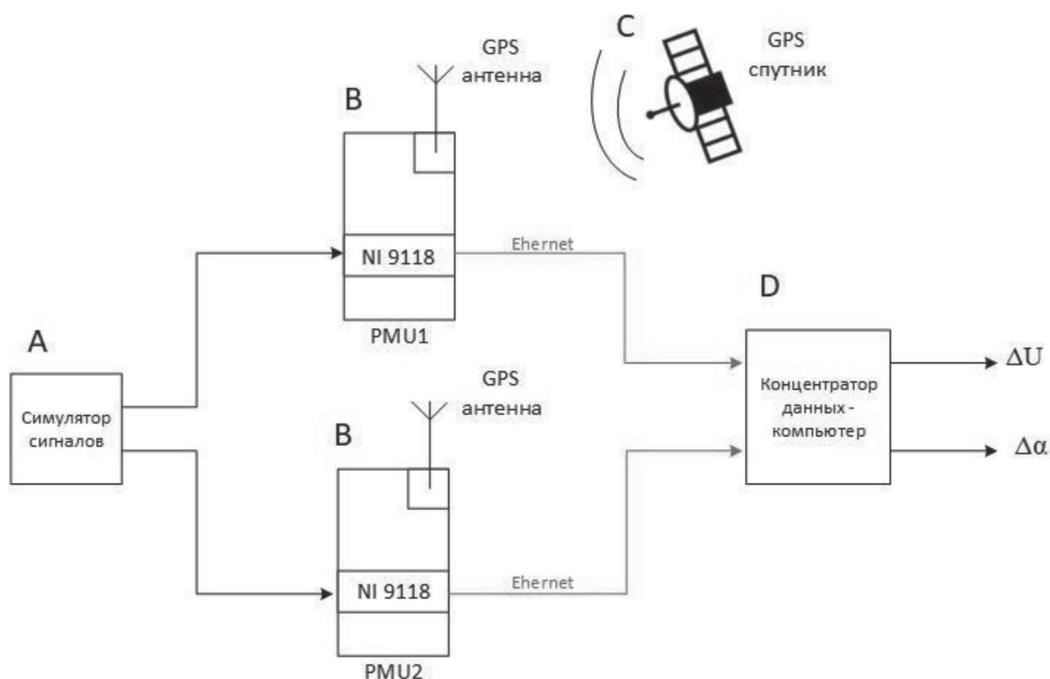


Рис. 1. Блок-схема эксперимента:

- А – симулятор сигналов, генерирует сигнал напряжения 220 В 50 Гц (амплитуда и угол);
 В – два блока на основе шасси NI cRIO-9118 и контроллера cRIO-9024 компании National Instrument, выполняющих роль PMU-устройства, оснащенного модулем GPS-синхронизации NI9467, с антенной Trimble, с точностью синхронизации не менее 100 нс (обозначены PMU1 и PMU2);
 С – глобальная навигационная спутниковая система (GPS, ГЛОНАСС);
 D – концентратор данных: компьютер вычисляет разницу измеренных данных PMU1 и PMU2 (ΔU , $\Delta \alpha$) и формирует результат в численной и графической форме.

Результаты и обсуждение / Results and discussion. Влияние потери сигнала GPS на работу PMU устройств. Для обеспечения точности измерения параметров сети необходима точная синхронизация времени. Очевидно, что приемник GPS может очень хорошо выполнять синхронизацию времени при условии, что он имеет стабильную связь со спутниками – источниками синхронного времени. Однако приемник GPS может потерять сигнал, даже если все условия синхронизации выполнены. Следовательно, необходимо произвести эксперимент для изучения точности измерений векторов фазы и угла тока и напряжения, в случае когда приемник GPS потерял связь со спутниками.

Смоделированный сигнал напряжения подается к устройствам PMU1 и PMU2, измеренные ими значения амплитуды и угла напряжения индексируются с помощью временной метки и направляются в концентратор данных через Ethernet-канал. Концентратор данных вычисляет разницу измеренных данных PMU1 и PMU2 (ΔU , $\Delta \alpha$) и выводит результат в виде табличных данных и графиков.

Ход эксперимента. В начале эксперимента происходит установление связи модулей GPS NI9467 с навигационными спутниками и их синхронизация. С 16-й минуты PMU1 и PMU2 работают со стабильной синхронизацией с точностью 100 нс. На 36-й минуте для имитации ухудшения сигнала антенна переносится в помещение в удалении от окна, таким образом модуль синхронизации теряет связь с частью спутников. На 61-й минуте антенна устройства PMU2 приемника экранируется и сигнал GPS полностью потерян. После нарушения связи с навигационными спутниками GPS обеспечение синхронизации зависит от частоты внутреннего тактового генератора

с резонансной частотой 40 МГц. В это время данные с РМУ1 можно считать эталонными для проверки отклонения. Данные амплитуды и угла измеренного вектора напряжения устройства РМУ2 вычитаются из эталонного значения измеренных данных амплитуды и угла вектора напряжения с устройства РМУ1. Результаты эксперимента приведены на рисунках 2, 3.

Исходя из полученных результатов (рисунок 2) потеря сигнала GPS не оказывает значительного влияния на точность измерения величины амплитуды напряжения. После помещения антенны приемника GPS-устройства РМУ2 в ящик стола (36-я минута), удаленного от окна, GPS приемник потерял связь с некоторыми спутниками, но этот фактор не оказал влияния работу GPS-приемника, синхронизация измерений осуществлялась за счет связи оставшихся спутников.

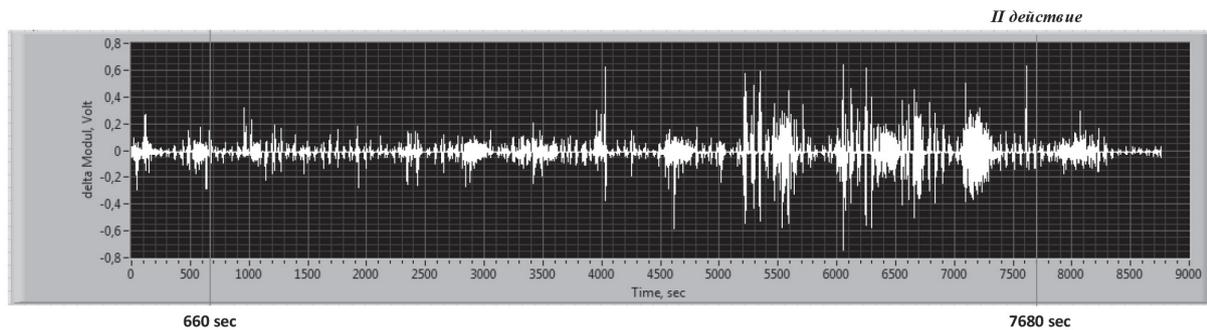


Рис. 2. Разница величин амплитуд напряжений устройств РМУ2 и РМУ1

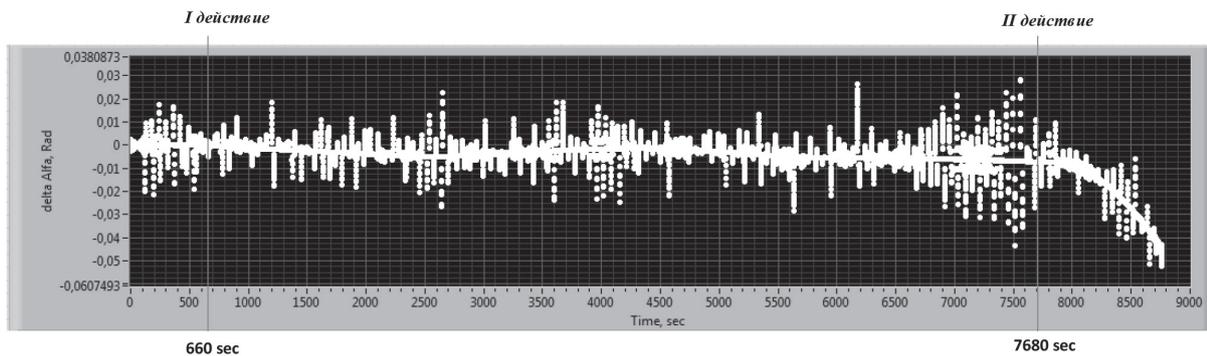


Рис. 3. Разница углов напряжений устройств РМУ2 и РМУ1

После экранирования антенны (61-я минута) синхронизация измерений зависит от частоты внутреннего кварцевого генератора, который обеспечивает необходимую точность синхронизации измерения угла еще в течение 59 минут. На 110-й минуте происходит резкое увеличение значения погрешности измерения угла, которая растёт с момента времени потери сигнала синхронизации. Погрешность в регистрации фазового угла на 183-й минуте превышает 0,009 рад, что ведет к превышению допустимой величины суммарной погрешности (TVE) = 1 % и не допускается стандартом [1].

После нарушения связи с навигационным спутником обеспечение синхронизации зависит от резонансной частоты кварцевого генератора и алгоритмов управления; можно сделать вывод, что кварцевый генератор, от которого напрямую зависит точность хода внутренних часов устройства, не всегда может обеспечить требуемую для измерений точность синхронизации по времени и измерения угла напряжения. Подобные погрешности критичны для надежности энергосистемы, поскольку измеряемые РМУ-параметры, зависящие от величины угла, – потоки активной и реактивной мощности в контролируемой цепи – необходимы для своевременного мониторинга и контроля электрической сети.

Скорость накопления погрешности измерений растет из-за изменений резонансной частоты кварцевого генератора, на которую, в свою очередь, могут влиять множество факторов, такие как температура, влажность, атмосферное давление, воздействия магнитного поля и радиации [7, 8]. Согласно данным исследованиям, температура является основной причиной отклонения резонансной частоты кварцевого генератора. Поэтому необходимо выявить зависимость температурной нестабильности кварцевого генератора и изучить возможность выявления и компенсации его нестабильности.

Исследование возможности компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора. Обеспечение требуемой точности временной синхронизации измерительных устройств при работе от внутренних часов и собственного тактового генератора возможно при компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора, зависящего от температурных условий работы.

Выявить искомую зависимость возможно, задавшись эквивалентом отсчета частоты либо времени. Таким эквивалентом выступает сигнал PPS-модуля GPS (Global Positioning System) системы глобального позиционирования.

Таким образом, имея эталон, необходимо замерять количество отсчетов тактового генератора, испытываемого реконфигурируемого шасси с изменением рабочей температуры. Изменение рабочей температуры выполнялось в термической стабилизированной камере в диапазоне температур от 0 до +50 °С. Схема эксперимента приведена на рисунке 4.

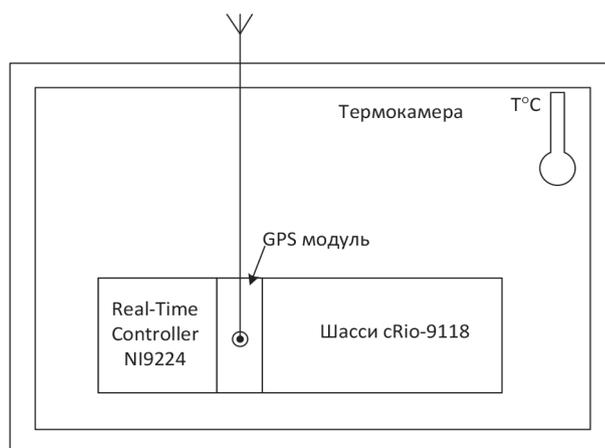


Рис. 4. Схема эксперимента

Данная часть эксперимента направлена на выявление закона изменения погрешности и возможности компенсации нестабильности кварцевого генератора. Для реализации данной задачи, как и в первой части эксперимента, применялось оборудование компании National Instrument, реконфигурируемое шасси NI cRIO-9118, работающее на базовой частоте тактового генератора 40 МГц с возможностью кратного умножения частоты до величины 200 МГц либо её деления.

Для реализации эксперимента разработана программа, выполняющая подсчет частоты тактового генератора в единицу времени эталона, работающая в реал-тайм-контроллере NI 9224 и с выполняющим функции управления реконфигурируемым шасси, а также функции накопления статистической информации и её передачи на локальный компьютер. Лицевая панель данной программы изображена на рисунке 5.

По результатам работы сформирована база систематических данных изменения частоты тактового генератора шасси cRIO-9118 в зависимости от температуры окружающей среды. Проанализировав полученные данные, определим зависимость частоты ТГ от температуры,

приведенную на рисунке 6. Средствами MS Excel определим коэффициенты полинома третьей степени, описывающего данную экспериментальную зависимость с достаточно высокой величиной достоверности аппроксимации, равной 0,9743.

Таким образом, зная зависимость изменения частоты тактового генератора от рабочей температуры, несложно рассчитать зависимость от температуры составляющую погрешности внутренних часов, построенных на данном тактовом генераторе

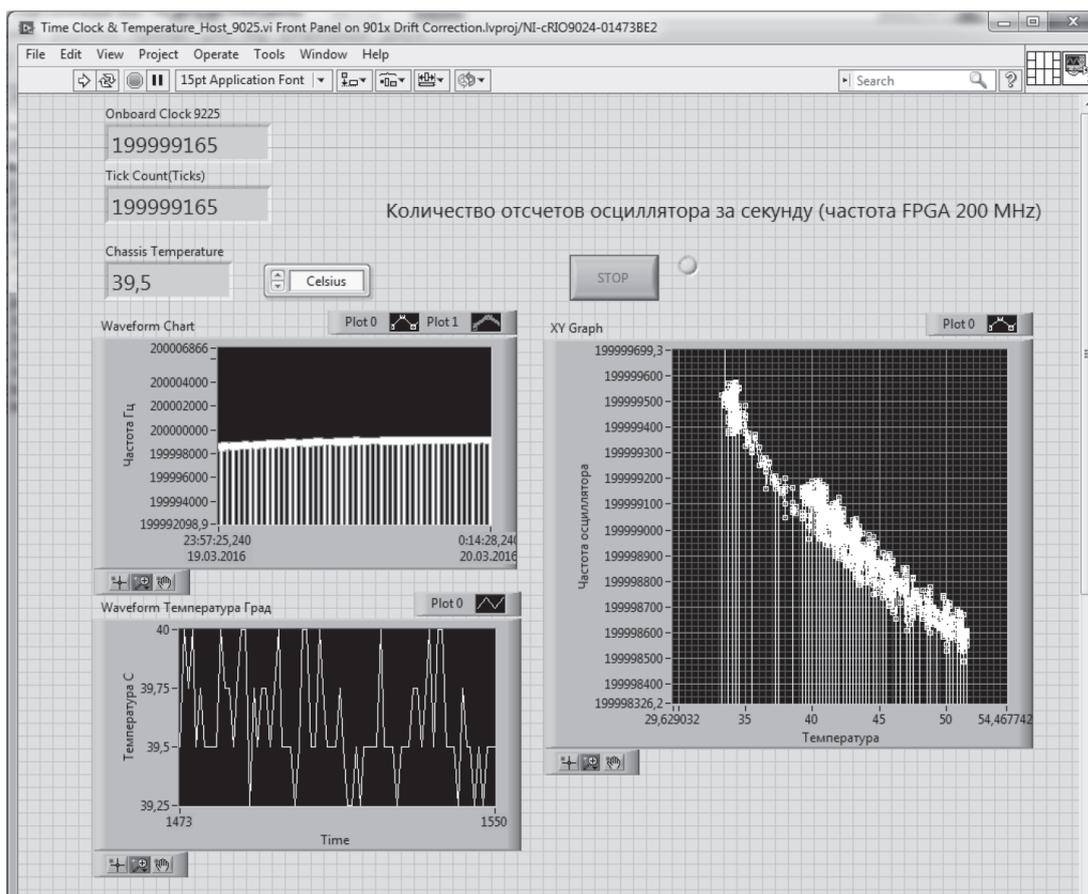


Рис. 5. Лицевая панель программы подсчет частоты тактового генератора в единицу времени эталона

Учитывая размер временного шага между соседними отсчетами исследуемого ТГ на частоте 200 МГц, равного 5 нс, возможен расчет прогнозных величин ошибок часов, построенных на основе исследуемого ТГ. Данная зависимость от температуры прогнозных величин отклонения часов на базе исследуемого ТГ приведена на рисунке 7. Согласно стандарту [1] синхронизация измерений должна быть с точной привязкой по фазе к времени UTC не более 1 мкс. Полученные результаты показывают, что при эксплуатации конкретного устройства с ТГ в диапазоне температур ± 10 °С от рабочей будет накапливаться систематическая погрешность времени, что может оказать существенное влияние на достоверность и своевременность полученных измерений. Располагая зависимостью температуры от частоты тактового генератора, возможно ввести коррекцию временных отсчетов часов в любом ИЭУ, задавая пропорциональное количество отсчетов тактового генератора для текущей температуры.

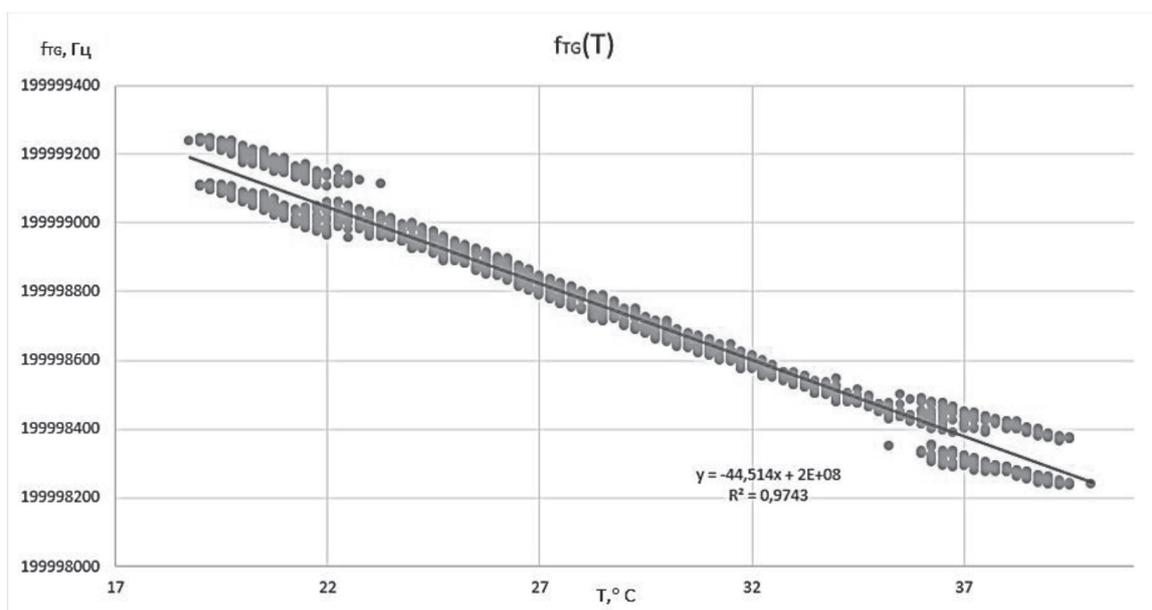


Рис. 6. Экспериментальная зависимость частоты тактового генератора от рабочей температуры

Программная компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора. Изучив множество методов температурной компенсации кварцевых генераторов, мы выявили достоинства и недостатки каждого из них. Самый распространенный способ, конечно, это изначально разрабатывать КГ со схемной реализацией компенсации. Однако в условиях, которые мы рассматриваем в данной статье, а именно непрерывная работа имеющегося оборудования со стандартными решениями по стабилизации тактовой частоты на электроэнергетических объектах, такое решение не является оптимальным и быстро внедряемым. Предлагаемый способ подразумевает программное решение данной проблемы, которое можно легко реализовать в виде подпрограммы и начать использовать на реальных объектах.

Основываясь на полученной экспериментальным путем зависимости температуры от частоты осциллятора, изображенной на рисунке 6, выведем зависимость, позволяющую компенсировать влияние температуры на частоту осциллятора. Для этого запишем формулу определения коэффициента температурной нестабильности кварцевого генератора:

$$K = f_{\text{баз}} - f_{\text{мек}} (\text{°C}), \quad (1)$$

где K – коэффициент температурной нестабильности, $f_{\text{баз}}$ – базовая частота, с которой работает тактовый генератор, $f_{\text{мек}} (\text{°C})$ – фактическая частота при текущей температуре окружающей среды.

Получив значение коэффициента K , мы можем скорректировать частоту осциллятора, соответствующую единице времени, то есть изменить частоту осциллятора так, чтобы единица времени не изменилась и устройства работали синхронно.

Алгоритм, описывающий решение проблемы компенсации температурной нестабильности, представлен на рисунке 7. Исходя из этого имеем определенную последовательность действий.

1. Начало работы программы.
2. Ввод исходных данных (базовой частоты осциллятора, базовой температуры – T , текущей температуры окружающей среды – t).
3. Определение допустимого отклонения текущей температуры от базовой (ε).
4. Определение наличия температурного отклонения. Если такого не наблюдается ($|T - t| \leq \varepsilon$), тогда алгоритм продолжает измерять данные и наблюдать за стабильностью системы. Как только условие выполняется, алгоритм переходит к восстановлению температурной стабильности.

5. Рассчитывается коэффициент температурной нестабильности по формуле (1).
6. Определяется новая частота, которая должна соответствовать единице времени.
7. Происходит корректировка единицы времени в тактах внутренних часов с учетом новой частоты осциллятора.
8. Программа завершает текущий цикл и переходит к дальнейшему наблюдению за системой.

Также согласно классическому выполнению программ, алгоритм имеет блок цифровой обработки ошибок, однако для наглядного процесса решения проблемы температурной нестабильности КГ, данный блок не был отображен.

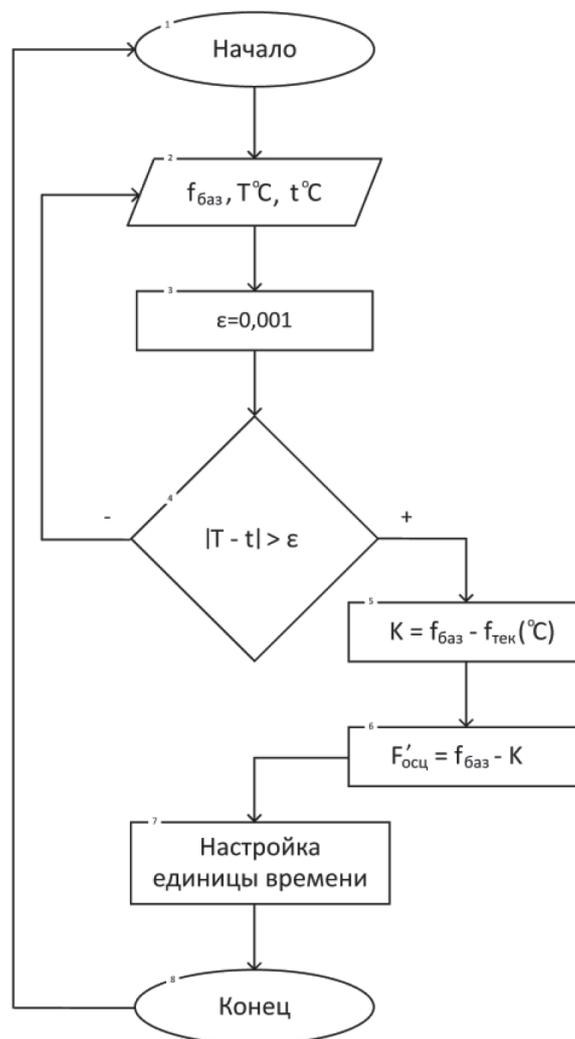


Рис. 7. Алгоритм компенсации температурной нестабильности кварцевых генераторов

Авторская реализация температурной компенсации кварцевых генераторов представлена на рисунке 8 в виде программы в среде LabView FPGA [9], протестированной далее в эксперименте с использованием двух контроллеров CompactRIO в качестве эталонного устройства и устройства, потерявшего связь с GPS.

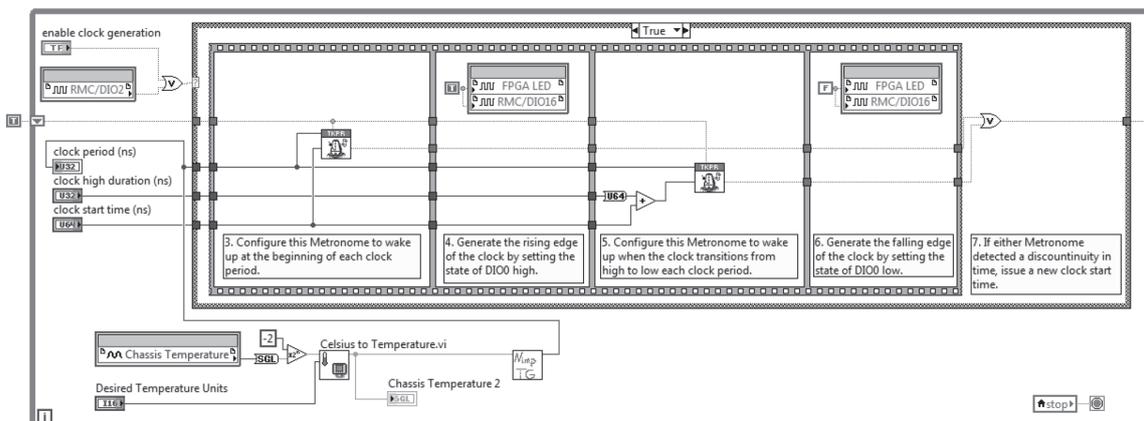


Рис. 8. Авторская реализация программы температурной компенсации кварцевых генераторов в виде кода в среде LabView FPGA

Исследование возможности компенсации температурной нестабильности кварцевого генератора с применением разработанной программы. Чтобы проверить функциональность разработанной программы на основе предложенного выше алгоритма, используем схему, которая была рассмотрена во второй части эксперимента (рисунок 4). Процесс исследования сигнала аналогичен, за исключением внесения дополнительной обработки в виде программы температурной компенсации ТГ.

Суть эксперимента заключалась в следующем: устройство, потерявшее связь с внешней синхронизацией, намеренно помещалось в условия с постепенным изменением температуры в диапазоне от 17 °С до 37 °С, данные о температуре и генерируемой частоте передавались на ПК, а далее программа компенсировала изменение частоты в зависимости от температуры, согласно разработанному алгоритму.

На рисунке 9 отображены результаты эксперимента.

В результатах работы программы температурной компенсации прослеживается определенная закономерность: алгоритм допускает выбросы значений при одном и том же значении температуры. Отклонения происходят из-за особенности проведения эксперимента: медленного изменения температуры. Система измерений несколько раз фиксирует одно и то же значение температуры, и программа соответственно столько же раз его и обрабатывает, накладывая при этом определенную погрешность.

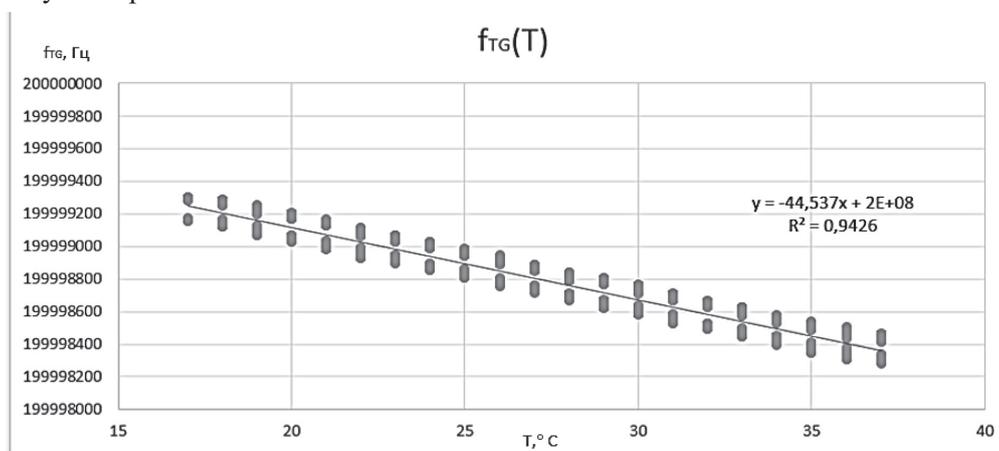


Рис. 9. Результат работы программы температурной компенсации в диапазоне от 16 °С до 37 °С

Применение компенсации позволило линеаризовать зависимость и снизить влияние температуры на частоту с значений 0,65 такта на градус Цельсия до значений 0,04 такта на градус Цельсия для 200 МГц генератора. Таким образом, вторичный задающий генератор [10] для систем измерения параметров электрической сети может продолжительное время сохранять точность хода часов на стабильно высоком уровне при потере сигнала от первичного (эталонного) источника времени более высокого качества.

Заключение / Conclusion. В результате проделанных экспериментов получена качественная информация о поведении систем измерения при нарушении условий временной синхронизации, а также определен характер отклонения частоты кварцевого генератора измерительного устройства в силу изменения внешних температурных условий.

Поставленная в работе цель достигнута, разработан способ программной коррекции частоты тактового генератора внутренних часов промышленного контроллера. Опробование способа показало его эффективность и возможность применения в системах измерения электрических величин. Основными потенциальными потребителями данного способа коррекции частоты тактового генератора и, как следствие, внутренних часов устройства являются производители счетчиков электрической энергии, устройств мониторинга переходных режимов в электрических сетях, векторных регистраторов, устройств релейной защиты и автоматики электрических систем и сетей. Данный способ возможно использовать как во вновь производимых устройствах, так и в существующих работающих измерительных комплексах и устройствах измерения путем программной коррекции заложенных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. IEEE C37.118.1,2-2011. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. – The Institute of Electrical and Electronics Engineers: 2011 г. – Text : unmediated.
2. ГОСТ Р МЭК 60122-1–2009. Резонаторы оцениваемого качества кварцевые. Ч. 1. Общие технические условия. Введ. 2011-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 27 с. – Текст : непосредственный.
3. WGS 84. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS_84 (дата обращения: 18.05.2022). – Текст : электронный.
4. Атомные часы – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%8B (дата обращения 18.05.2022 г.). – Текст : электронный.
5. Михайлов, С. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемник / С. Михайлов // Беспроводные технологии. – 2006. – № 2 (3). – Текст : непосредственный.
6. СТО 59012820.29.020.011-2016 СТАНДАРТ организации АО «Системный оператор единой энергетической системы» Релейная защита и автоматика. устройства синхронизированных векторных измерений. нормы и требования. Москва, 2016. – Текст : непосредственный.
7. Хоменко, И. В. X76-Кварцевые резонаторы и генераторы : учеб. пособие / И. В. Хоменко, А. В. Косых ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – 160 с. : ил. – Текст : непосредственный.
8. Смагин, А. Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А. Г. Смагин, М. И. Ярославский. – Москва : Энергия, 1970. – 488 с. – Текст : непосредственный.
9. Баран, Е. Д. Б24 LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы / Е. Д. Баран. – Москва : ДМК Пресс, 2009. – 448 с. – Текст : непосредственный.
10. Рекомендация МСЭ-Т G.810. «Термины и определения для сетей синхронизации», 08/96. – Текст : непосредственный.

REFERENCES AND INTERNET RESOURCES

1. IEEE S37.118.1,2-2011. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. -The Institute of Electrical and Electronics Engineers: 2011 g.

2. GOST R MEK 60122-1–2009. Rezonatory ocenivaemogo kachestva kvarcevye (Quartz resonators of the estimated quality). Ch. 1. Obshchie tehicheskie usloviya. Vved. 2011-01-01. – Moskva : Standartinform, 2010. – 27 s.
3. WGS 84. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS_84 (data obrashcheniya: 18.05.2022).
4. Atomnye chasy (Atomic clocks) – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%8B (data poseshcheniya 18.05.2022 g.).
5. Mihailov, S. Vliyanie mnogoluchevosti rasprostraneniya radiovoln ot navigacionnogo kosmicheskogo apparata na tochnost' opredeleniya koordinat GPS-priemnik (The effect of multipath propagation of radio waves from a navigation spacecraft on the accuracy of determining the coordinates of the GPS receiver) / S. Mihailov // Besprovodnye tehnologii. – 2006. – No 2(3).
6. STO 59012820.29.020.011-2016 STANDART organizacii AO «Sistemnyj operator edinoj energeticheskoy sistemy» Releynaya zashchita i avtomatika. Ustroistva sinhronizirovannykh vektornykh izmerenij. Normy i trebovaniya (Relay protection and automation. Devices of synchronized vector measurements. Norms and requirements). – Moskva, 2016.
7. Homenko, I. V. Kh76 Kvarcevye rezonatory i generatory (X76 Quartz resonators and generators): uchebnoe posobie / I. V. Homenko, A. V. Kosyh ; Minobrnauki Rossii, OmGTU. – Omsk : Izd-vo OmGTU, 2018. – 160 s. : il.
8. Smagin, A. G. P'ezoelektrichestvo kvarca i kvarcevye rezonatory (Quartz piezoelectricity and quartz resonators) / A. G. Smagin, M. I. Yaroslavskii. – Moskva : Energiya, 1970. – 488 s.
9. Baran, E. D. B24 LabVIEW FPGA. Rekonfiguriruemye izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy (B24 LabVIEW FPGA. Reconfigurable measuring and control systems) / E. D. Baran. – Moskva : DMK Press, 2009. – 448 s.
10. Rekomendaciya MSE-T G.810. «Terminy i opredeleniya dlya setej sinhronizacii» (Terms and definitions for synchronization networks), 08/96.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Звада Павел Александрович, старший научный сотрудник, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения, инженерный институт, СКФУ, г. Ставрополь. E-mail: pzvada@ncfu.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Pavel Zvada, Senior Researcher, Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, NCFU, Stavropol. E-mail: pzvada@ncfu.ru