

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ЦИФРОВОГО ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА С ТЕРМОДАТЧИКОМ НА ОСНОВЕ ДВУХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В статье дана теоретическая предельная оценка стабильности цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов. Получены результаты: 7,5 ppb (для беспокойной среды) и 0,75 ppb (для спокойной среды). Исследованы технические решения получения линейной однозначной зависимости значения разностной частоты от температуры и увеличения крутизны этой зависимости, позволяющие получать разрешение по измерению температуры до 0,001 °С.

Ключевые слова: термодатчик, кварцевый генератор, термокомпенсация, температурная стабильность, спокойная среда, беспокойная среда.

Актуальность. В современном развитии систем телекоммуникаций, геопозиционирования, телеуправления и измерительной техники одну из главных ролей играет источник стабильной опорной частоты, который во многом определяет характеристики перечисленных систем. В большинстве случаев таким источником является термокомпенсированный кварцевый генератор (ТККГ). В то же время современное развитие микросхем цифровой обработки сигналов эффективно способствует развитию цифровых методов термокомпенсации кварцевых генераторов, способных учитывать термодинамические особенности их функционирования [1, 2]. Таким образом, высокие характеристики цифрового ТККГ (ЦТККГ), такие как производительность счётно-решающего устройства (микроконтроллера или ПЛИС), точность измерения температуры и эффективность алгоритма формирования компенсирующей функции являются решающими в обеспечении высокой стабильности ЦТККГ. Одной из этих характеристик является точность измерения температуры термодатчиком (ТД), что будет всегда являться актуальной задачей для исследователей.

Введение. Термокомпенсации кварцевых генераторов посвящено много трудов. Отдельным направлением поиска эффективных методов термокомпенсации стало использование самих кварцевых

генераторов в качестве термодатчиков схем термокомпенсации. В названном качестве использование кварцевого генератора нашло два подхода.

Первый — использование термочувствительной механической моды кварцевого резонатора, возбуждаемого одновременно на двух модах [3–6]. Одна мода (основная) является полезным продуктом работы генератора, частоту которой необходимо корректировать в результате влияния изменения температуры, а вторая мода — термочувствительная, является носителем информации в виде зависимости частоты второй моды от температуры.

Второй подход — использование отдельного кварцевого генератора (или двух) в качестве термодатчика. Наиболее близкими аналогами исследуемым в настоящей статье техническим решениям являются [6] и [7], где были предложены способы термокомпенсации использованием двух генераторов, имеющих в своём составе резонаторы с различными типами срезов (АТ и У или АТ и БТ). Обработка сигналов (меандров) двух генераторов происходит во временной области оперированием зависимыми от температуры периодами двух импульсных последовательностей (меандров) от названных генераторов, один из которых в результате алгоритма обработки этих последовательностей подстраивается для компенсации собственного температурного дрейфа.

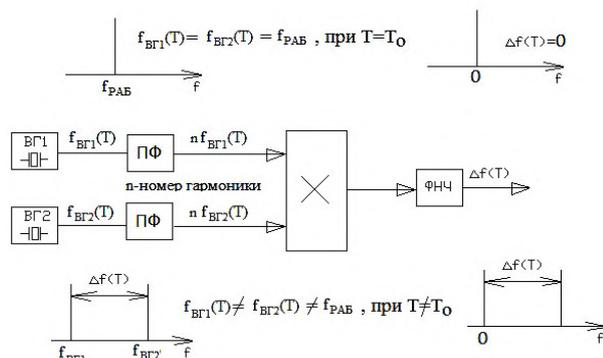


Рис. 1. Структурная схема термодатчика на основе двух вспомогательных генераторов

Максимальное концептуальное сходство с исследуемыми в настоящей работе решениями отмечается в работах [8] и [9], но в указанных работах предлагаются сложные способы вычисления значения температуры, использующие сигнальные процессоры и цифровую обработку сигналов.

В отличие от описанных выше способов — [7], [10], [8] и [11], в настоящей статье исследуется решение с использованием в термодатчике двух вспомогательных кварцевых генераторов, как в [12].

Цель работы — определить теоретический предел возможного повышения стабильности частоты для термокомпенсированного кварцевого генератора. Для достижения цели в статье подробно исследуется способ повышения разрешающей способности измерения термодатчика на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов; структура ТККГ с цифровой термокомпенсацией; описание сделанных допущений.

Новым в предлагаемой работе является поиск теоретического предела достижения стабильности частоты термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов с учётом описываемых в статье допущений.

Термодатчик на основе двух вспомогательных генераторов. Структурная схема рассматриваемого термодатчика, использующего свойство строгой зависимости отклонения частоты кварцевого генератора от температуры, изображена на рис. 1.

Как известно, вид температурно-частотной характеристики (ТЧХ) резонатора АТ-среза зависит от значения угла среза [13]. На рис. 2 изображено семейство ТЧХ резонаторов АТ для углов среза $+35^\circ$, используемых в рассматриваемом ТД.

На рис. 2: ТЧХ ВГ1 (угол АТ-среза: $+35^\circ + 16'$) и ТЧХ ВГ2 (угол АТ-среза: $+35^\circ - 4'$) — ТЧХ первого вспомогательного генератора и второго вспомогательного генератора соответственно (рис. 1), ТЧХ ПГ (угол АТ-среза: $+35^\circ + 4'$ — наиболее широко используемый срез) — ТЧХ подстраиваемого генератора (ПГ), которую необходимо термокомпенсировать. Температура точки перегиба для приведённых ТЧХ одинаковая: $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Выражение, описывающее ТЧХ АТ-среза, измеряющееся в относительных единицах на миллион ($1 \cdot 10^{-6}$), или ppm [14]:

$$\delta(T) = [a_{00}(T - T_0) + b_{00}(T - T_0)^2 + c_{00}(T - T_0)^3] \cdot 10^6, \quad (1)$$

где a_{00} , b_{00} , c_{00} — температурные коэффициенты соответственно первого, второго и третьего порядков, числовые значения которых зависят от свойств пластины кварца резонатора.

Функционирование исследуемого термодатчика осуществляется следующим образом. При темпера-

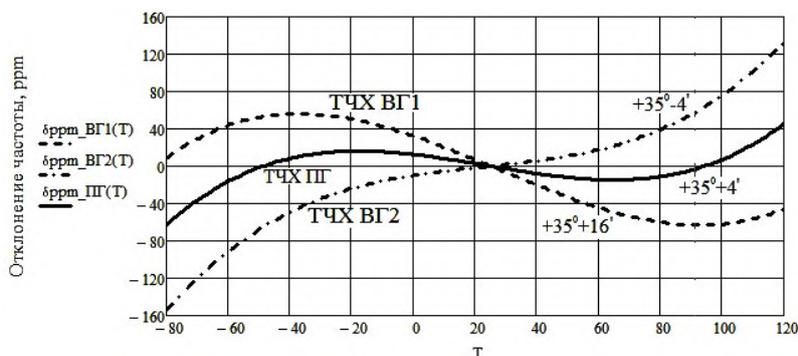


Рис. 2. Семейство ТЧХ резонаторов АТ для различных значений угла среза, используемых в ВГ и ПГ

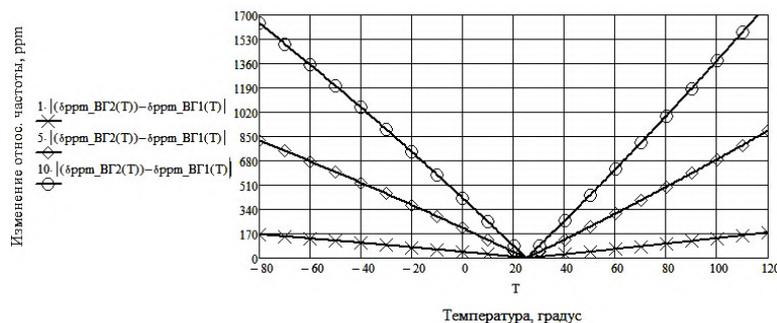


Рис. 3. Изменение относительной разностной частоты от температуры

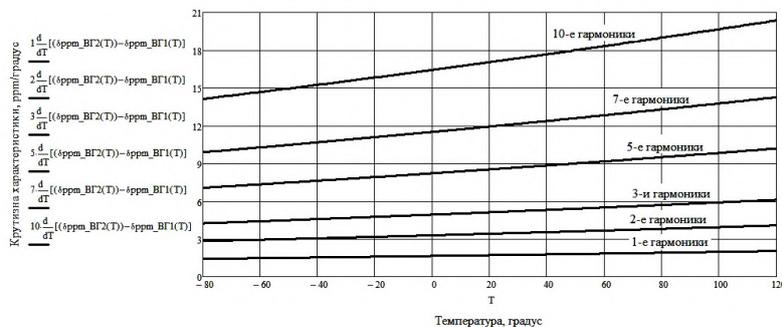


Рис. 4. Графики скорости изменения (крутизны) относительной разностной частоты от температуры

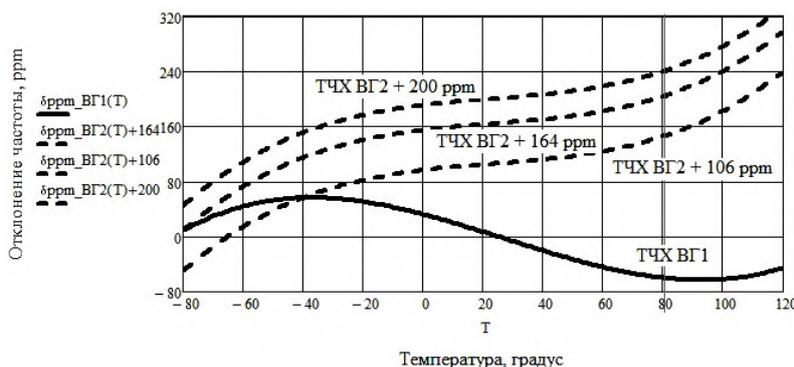


Рис. 5. График ТЧХ ВГ1 (несмещенный), ТЧХ ВГ2 (смещенный)

туре $T = T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура, соответствующая точке перегиба) ВГ1 и ВГ2 генерируют сигналы с одинаковыми рабочими частотами, при перемещении этих сигналов разностная частота $\Delta f = 0$. При температуре $T \neq T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, в результате перемножения сигналов (или одинаковых гармоник частот сигналов) вспомогательных кварцевых генераторов ВГ1 и ВГ2 (рис. 1) образуется сигнал с разностной термозависимой частотой $\Delta f(T)$. Необходимые гармоники частот сигналов ВГ1 и ВГ2 выделяются полосовыми фильтрами ПФ из спектров ВГ1 и ВГ2. ФНЧ подавляет продукты перемножения высоких порядков и пропускает разностную частоту $\Delta f(T)$, которая при необходимости может быть усилена. Определённой температуре соответствует определённое значение частоты $\Delta f(T)$, что может быть использовано в системах термокомпенсации кварцевого генератора.

Для иллюстрации графиков изменения относительной разностной частоты от температуры на рис. 3 выбраны (некоторые из возможно используемых) гармоники частоты сигналов вспомогательных генераторов ВГ1 и ВГ2: или 1-е гармоники, или 5-е гармоники, или 10-е гармоники.

Характеристики зависимости, изображённой на рис. 3, следующие:

1) линейность: коэффициент корреляции Пирсона 0,999 (максимальное значение 1 — наличие полной положительной линейной связи);

2) крутизна полученной зависимости определяется номером используемых при перемножении гармоник сигналов, выделяемых полосовыми фильтрами ПФ из спектра ВГ1 и спектра ВГ2 (рис. 1). Для иллюстрации на рис. 4 графики скорости изменения (крутизны) разностной частоты от температуры — первая производная разности ТЧХ ВГ2 и ТЧХ ВГ1, выбраны некоторые используемые гармоники частоты сигналов ВГ1 и ВГ2: или

1-е, или 2-е, или 3-й, или 5-е, или 7-е, или 10-е гармоники;

3) зависимость имеет неоднозначность (качественную): одному значению разностной частоты соответствуют два значения температуры (за исключением температуры T_0).

Неоднозначность характеристики (например, в диапазоне температур от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$) устраняется смещением значения одной из рабочих частот вспомогательных генераторов на величину

$$\Delta = [(a_{\text{ВГ2}} - a_{\text{ВГ1}})(T - T_0) + (b_{\text{ВГ2}} - b_{\text{ВГ1}})(T - T_0)^2 + (c_{\text{ВГ2}} - c_{\text{ВГ1}})(T - T_0)^3] \cdot 10^6, \quad (2)$$

где $a_{\text{ВГ1}}$ ($a_{\text{ВГ2}}$), $b_{\text{ВГ1}}$ ($b_{\text{ВГ2}}$) и $c_{\text{ВГ1}}$ ($c_{\text{ВГ2}}$) — коэффициенты полиномов, описывающих ТЧХ соответствующих АТ-срезов резонаторов ВГ1 и ВГ2;

T — температура, при которой значения величин названных полиномов равны друг другу (на рис. 5 — это температура минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ для сплошной линии — это ТЧХ ВГ1, и средней пунктирной линии, обозначенной как «ТЧХ ВГ2 + 164 ppm »).

При этом характеристики выглядят так, как изображено на рис. 5, где средняя пунктирная характеристика смещена для работы датчика от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$, а нижняя пунктирная — от минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Тот же эффект можно получить смещением значений обеих частот ВГ1 и ВГ2: одной на $+\Delta/2$, другой на $-\Delta/2$ или наоборот.

Полученная смещением однозначная характеристика изображена на рис. 6.

Сплошной график на рис. 6 — устранение неоднозначности для температуры от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше, пунктирный — от минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше. При этом необходимый сдвиг ТЧХ ВГ2 составил около 164 ppm и 105 ppm соответственно (тот же эффект достигается при сдвиге обеих частот на половину

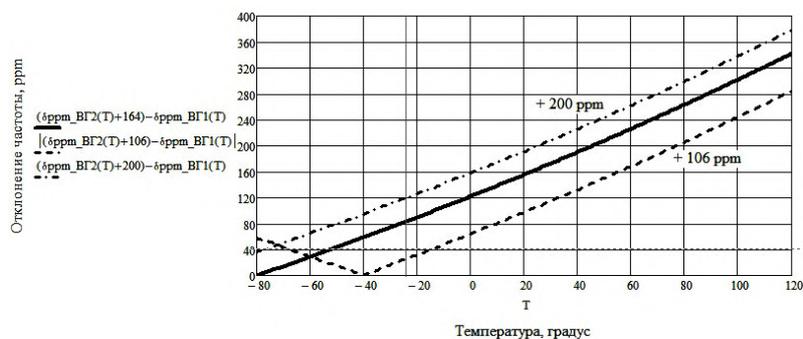


Рис. 6. Изменение относительной разностной частоты сигналов вспомогательных генераторов ВГ1 и ВГ2 от температуры при использовании 1-х гармоник (сплошная линия — смещение ВГ2 на +164 ppm)

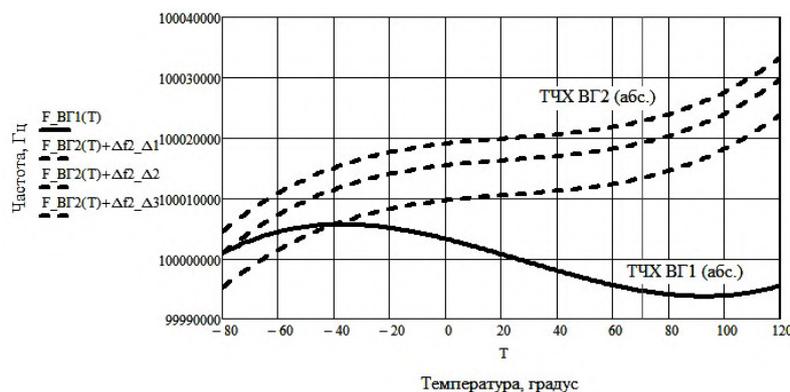


Рис. 7. График ТЧХ ВГ1 и ТЧХ ВГ2 (абсолютные значения частот)

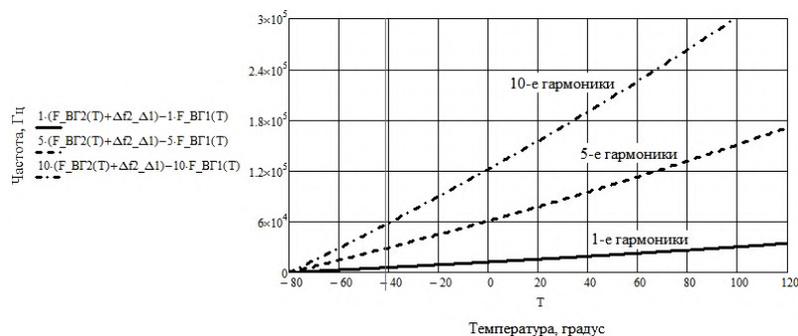


Рис. 8. График изменения разностной частоты

указанных сдвигов, то есть на ± 82 ppm и $\pm 52,5$ ppm соответственно). Также смещение Δ может быть выбрано с таким условием, чтобы при минимальной температуре рабочего диапазона температур значение разностной частоты имело значение более нуля (штрих-пунктирный график при смещении +200 ppm при температуре минус 80 °C имеет значение около 36 ppm) с целью исключения нестабильной работы пороговых устройств (гистерезис триггера Шмидта) и цифровых микросхем, используемых в схеме ЦТККГ. Возможность смещения частоты кварцевых генераторов на величину ± 100 ppm исследовано в [15].

Для иллюстрации абсолютных значений за рабочую частоту ВГ1 и ВГ2 принято 100 МГц при температуре $T_0 = 25$ °C: на рис. 7 изображены график ТЧХ ВГ1 и ТЧХ ВГ2 (при смещении, соответствующем рис. 5) в абсолютных значениях частоты, на рис. 8 — график изменения разностной частоты от изменения температуры при использовании или 1-х, или 5-х, или 10-х гармоник частот сигналов ВГ1 и ВГ2 в абсолютных значениях частоты.

Структурная схема ЦТККГ, использующая термодатчик на основе двух вспомогательных генераторов. Структурная схема ЦТККГ, использующего рассматриваемый ТД, приведена на рис. 9. Предполагается, что все элементы структурной схемы ЦТККГ в равной мере подвергаются действию окружающей эти элементы носителя температуры, и выделяемая при работе схемы тепловая энергия не влияет на ее работоспособность.

При некоторой температуре T (в пределах диапазона рабочих температур) вспомогательные генераторы ВГ1 и ВГ2 генерируют сигналы отличающихся частот $f_{ВГ1}(T)$ и $f_{ВГ2}(T)$. Для достижения максимальной температурной стабильности термокомпенсируемого подстраиваемого генератора (ПГ) целесообразно использовать гармоники частот сигналов вспомогательных генераторов $n \cdot f_{ВГ1}(T)$ и $n \cdot f_{ВГ2}(T)$, фильтруемые полосовыми фильтрами (ПФ) из общего спектра ВГ1 и ВГ2. Сигналы гармоник частот вспомогательных генераторов поступают на перемножитель (смеситель). В результате перемножения частот возникает разностная частота (рис. 9):

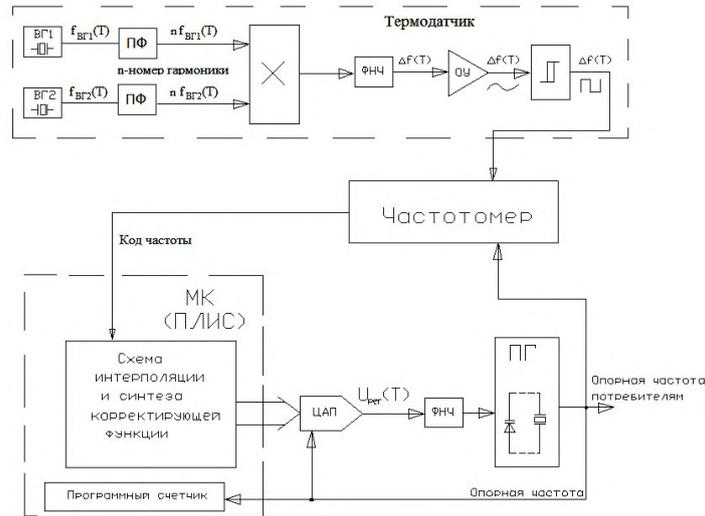


Рис. 9. Структурная схема ЦТККГ

$$\Delta f(T) = |n \cdot f_{\text{ВГ2}}(T) - n \cdot f_{\text{ВГ1}}(T)|. \quad (3)$$

После подавления ФНЧ продуктов смещения частот $n \cdot f_{\text{ВГ1}}(T)$ и $n \cdot f_{\text{ВГ2}}(T)$ разностная частота $\Delta f(T)$, форма напряжения которой является синусоидой, усиливается ОУ и с помощью триггера Шмидта преобразуется в форму цифрового сигнала (меандр). Полученный цифровой сигнал (меандр), имеющий частоту $\Delta f(T)$, подаётся в частотомер, измеряющий частоту посредством счёта числа периодов за известный интервал времени [16]. Результат счёта числа периодов со счётчика — код частоты, подаётся на микроконтроллер МК (или ПЛИС), который на основании кода частоты (соответствующего температуре) осуществляет синтез компенсирующей функции. В соответствии с алгоритмом функционирования МК (или ПЛИС), формирующим компенсирующую функцию, генерируется код для ЦАП, который формирует напряжение управления $U_{\text{упр}}(T)$ для подстройки кварцевого генератора (ПГ) с целью термокомпенсации ухода частоты. Необходимые коды в памяти МК формируются калибровкой всего устройства с помощью климатической камеры в реперных точках. Промежуточные значения температуры, которые не были учтены при калибровке, вычисляются интерполированием при выполнении алгоритма синтеза компенсирующей функции. Также в алгоритм синтеза компенсирующей функции возможно включение процедуры адаптивной динамической компенсации уходов частоты кварцевых генераторов в спокойной и неспокойной среде [1].

Калибровкой также достигается нивелирование нелинейности вольт-частотной характеристики подстраиваемого кварцевого генератора (ПГ).

Теоретическая оценка стабильности частоты ПГ. С целью получения теоретической оценки стабильности ПГ в схеме ЦТККГ, при использовании ТД на основе двух вспомогательных генераторов, в последующем анализе применены следующие условия:

1) современные микроконтроллеры (или ПЛИС) и ЦАП позволяют получить точность формирования компенсирующей функции, соответствующую стабильности до 0,01 ppm, при разрешении термодатчика по измерению температуры 0,01 °C [17];

2) диапазон рабочих температур ЦТККГ от минус 40 °C до +85 °C (индустриальный диапазон);

3) используемый метод измерения частоты — счёт числа периодов за известный интервал времени [16]. Метод измерения частоты по периоду повторения [16] не выбран по причине большого значения частоты счётных импульсов (заполняющих период): для достижения стабильности 0,001 ppm необходимая частота счётных импульсов должна быть около 226 МГц;

4) относительная предельная погрешность измерения частоты f_x [16] определяется выражением:

$$\delta_{\text{о.п.}} = \delta_{\text{о.п.}} + 1/(f_x \cdot T_{\text{изм}}), \quad (4)$$

где $\delta_{\text{о.п.}} = 10^{-6}$ — предельное значение нестабильности частоты кварцевого генератора, в схеме на рис. 10 это ПГ, опорная частота которого используется для частотомера схемы ЦТККГ (рис. 9). Значение выбрано из распространённых значений метрологических характеристик измерительных частотомеров. В исследуемой модели ЦТККГ предельное значение нестабильности частоты кварцевого генератора, которым является ПГ, имеют значения более стабильные (менее 10^{-6}), которые и имеет целью определить настоящая работа; $T_{\text{изм}}$ — время измерения частоты, которое выбрано из [1] для возможности использования адаптивной динамической компенсации уходов частоты кварцевых генераторов в спокойной и неспокойной среде. В [1] приведены зависимости погрешности измерения скорости изменения температуры от времени счёта для спокойной и неспокойной среды, и времена измерений $T_{\text{изм.сп}} = 2$ с (для спокойной среды) и $T_{\text{изм.несп.}} = 0,2$ с (для неспокойной среды) являются приближёнными значениями минимума названных в настоящем пункте зависимостей;

5) абсолютная погрешность измерения частоты f_x [18] определяется выражением:

$$\Delta_{\text{изм}} = \pm \delta_{\text{о.п.}} \cdot f_x; \quad (5)$$

6) для получения доверительной вероятности 0,997 одного (следующего) измерения абсолютная погрешность измерения должна быть в три раза меньше допустимого отклонения от измеряемой величины [9]. В реально работающей системе анализируемого ЦТККГ измерения происходят многократно и непрерывно, поэтому доверительная вероятность многократных измерений стремится к 1;

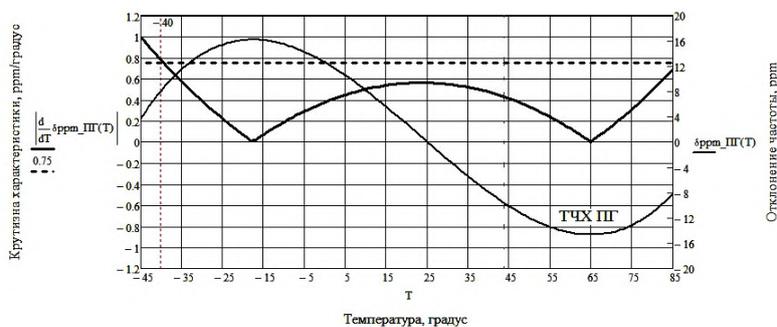


Рис. 10. График первой производной от ТЧХ ПГ — скорость изменения отклонения частоты от изменения температуры; график ТЧХ ПГ

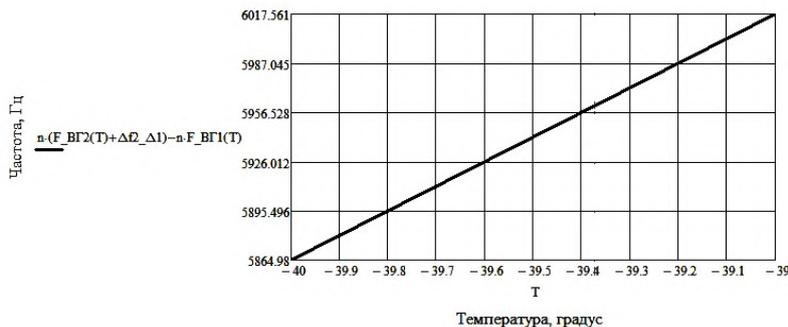


Рис. 11. Изменение разностной частоты (при использовании *первых* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2) в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С

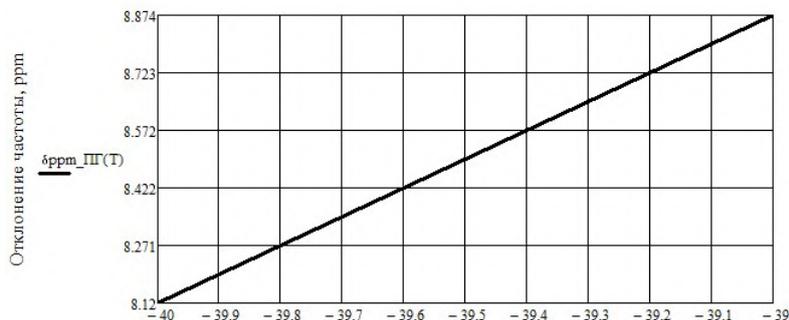


Рис. 12. График отклонения частоты ПГ в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С



Рис. 13. Изменение разностной частоты (при использовании *десятих* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2) в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С

7) разрядность счётчика частотомера достаточна для счёта импульсов за время измерения $T_{изм}$. Функционирование МК (или ПЛИС) в соответствии с алгоритмом формирования компенсирующей

функции способно обрабатывать код (разрядность) частоты частотомера.

Допущения, при которых дана теоретическая оценка стабильности частоты цифрового термоком-

Характеристики ЦТККГ при использовании первых гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2

Изменение температуры термодатчика	Изменение разностной частоты (рис. 11), Гц	Соответствующее изменение характеристики ТЧХ ПГ (рис. 12), ppm	Относительная предельная погрешность измерения частоты [15]	Абсолютная погрешность измерения частоты [17]	Теоретически достижимая стабильность
1 °С	152 Гц (6017 Гц – 5865 Гц = 152 Гц)	8,87 – 8,12 = 0,75 ppm	Для $T_{\text{полн}} = 0,02^{1)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 0,02 \text{ с}) = 0,00085$	0,00085·5865 Гц = 50,0 Гц (прекратно не превышает изменение РЧ ²⁾ 152 Гц)	0,75 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,1 °С	15,2 Гц	0,075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 0,2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 0,2 \text{ с}) = 0,000085$	0,00085·5865 Гц = 5,0 Гц (прекратно не превышает изменение РЧ 15,2 Гц)	0,075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,01 °С	1,52 Гц	0,0075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000085$	0,00085·5865 Гц = 0,5 Гц (прекратно не превышает изменение РЧ 1,52 Гц)	0,0075 ppm (для спокойной среды)
0,001 °С	0,152 Гц	0,00075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000085$	0,00085·5865 Гц = 0,5 Гц (прекратно не превышает изменение РЧ 0,152 Гц)	стабильность 0,00075 ppm недостижима

Примечания:

- 1) $T_{\text{полн}} = 0,02 \text{ с}$ — (время измерения в 10 крат меньшее $T_{\text{полн,ст}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,75 ppm (худшей в приведённых вычислениях при использовании 1-х гармоник);
- 2) РЧ — разностная частота.

пенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов:

- в конструкции генератора идеальная тепловая связь между элементами датчика температуры и опорным резонатором генератора с отсутствием градиента температур между ними;

- точно известны значения температурных коэффициентов первого, второго и третьего порядков статических ТЧХ резонаторов, значения коэффициентов динамического поворота ТЧХ, сдвига ТЧХ, времени запаздывания показаний термодатчика.

Очевидно, что максимальная погрешность термокомпенсации («худшая» точка) возникает на участках ТЧХ с максимальной скоростью изменения характеристики от изменения температуры. Взяв первую производную от функции ТЧХ подстраиваемого генератора (рис. 2 ТЧХ ПГ), определили максимальную скорость изменения частоты ПГ при изменении температуры, что составило не более 0,75 ppm (при температуре минус 40 °С) на один градус изменения температуры (рис. 10).

С целью получения максимальной крутизны изменения разностной частоты при изменении температуры целесообразно использовать максимально возможные частоты вспомогательных генераторов. В настоящей статье в расчётах будет использоваться рабочая частота вспомогательных генераторов 100 МГц при температуре T_0 .

Анализируя в совокупности две характеристики:

- характеристику разностной частоты в абсолютном значении (рис. 11) в диапазоне изменения температуры: от минус 40 °С до минус 39 °С, при использовании *первых* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2;

- характеристику ТЧХ ПГ (практически линейную в диапазоне от минус 40 °С до минус 39 °С, где существует максимальная скорость изменения ТЧХ), изображённую на рис. 12;

- определено соответствие (тождественная пропорция) изменения разностной частоты в абсолютном значении изменению ТЧХ ПГ, что будет соответствовать теоретически достижимой стабильности ЦТККГ (расчёты в табл. 1).

Аналогичный анализ проводится при использовании 10-х гармоник вспомогательных генераторов: анализируются в совокупности две характеристики, изображённые на рис. 12 и 13. Результаты приведены в табл. 2.

Заключение. В статье проведена теоретическая оценка стабильности цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов. Анализ математической модели ТД показал возможность достижения разрешения по измерению температуры 0,001 °С при использовании десятых гармоник частоты сигналов вспомогательных генераторов. Для оценки возможности использования более высоких гармоник вспомогательных генераторов с целью достижения более высокого разрешения по измерению температуры для исследуемой структуры термодатчика необходимо проведение исследования свойств гармоник с номерами 11 и более.

Анализ математической модели схемы ЦТККГ с термодатчиком на основе двух вспомогательных генераторов при указанных выше допущениях показал возможность достижения стабильности:

- 0,075 ppm (для неспокойной среды) и 0,0075 ppm (для спокойной среды) при использовании первых гармоник вспомогательных генераторов;

Таблица 2

Характеристики ЦТККГ при использовании десятых гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2

Изменение температуры термодатчика	Изменение разностной частоты (рис. 13), Гц	Соответствующее изменение характеристики ГЧХ ПГ (рис. 12), ppm	Относительная предельная погрешность измерения частоты [15]	Абсолютная погрешность измерения частоты [17]	Теоретически достижимая стабильность
1 °С	1525 Гц (60175 Гц – 58650 Гц = 1525 Гц)	8,87 – 8,12 = 0,75 ppm	Для $T_{\text{ном}} = 0,002^{1)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,002 \text{ с}) = 0,0085$	0,0085·58650 Гц = 50 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 1525 Гц)	0,75 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,1 °С	152,5 Гц	0,075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = 0,02^{2)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,02 \text{ с}) = 0,00085$	0,00085·58650 = 50 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 152,5 Гц)	0,075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,01 °С	15,25 Гц	0,0075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = T_{\text{ном,исп}} = 0,2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,2 \text{ с}) = 0,000085$	0,000086·58650 = 5 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 15,25 Гц)	0,0075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,001 °С	1,525 Гц	0,00075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = T_{\text{ном,исп}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000095$	0,000095·58650 = 0,56 Гц (не превышает ³⁾ изменение РЧ 1,525 Гц)	0,00075 ³⁾ ppm (для спокойной среды)
			Для $T_{\text{ном}} = 2,3^{4)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 2,3 \text{ с}) = 0,0000084$	0,000084·58650 = 0,49 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 1,525 Гц)	0,00075 ppm (для спокойной среды)

Примечания:

- 1) $T_{\text{ном}} = 0,002 \text{ с}$ — (время измерения в 100 крат меньше $T_{\text{ном,исп.}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,75 ppm (худшей в приведённых вычислениях при использовании 10-й гармоники);
- 2) $T_{\text{ном}} = 0,02 \text{ с}$ — (время измерения в 10 крат меньше $T_{\text{ном,исп.}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,075 ppm;
- 3) абсолютная погрешность измерения частоты 0,56 Гц троекратно превышает изменение разностной частоты $0,56 \cdot 3 = 1,68 > 1,525 \text{ Гц}$, при этом достоверная вероятность измерения составит не 0,997, а несколько меньшую. В реально работающей системе предложенного ТККГ измерения происходят многократно и непрерывно, поэтому достоверная вероятность многократных измерений стремится к 1;
- 4) $T_{\text{ном}} = 2,3 \text{ с}$ — (превышает $T_{\text{ном,исп}} = 2 \text{ с}$), при котором абсолютная погрешность измерения частоты 0,49 Гц троекратно не превышает изменение разностной частоты $0,49 \cdot 3 = 1,47 < 1,525 \text{ Гц}$.

— 0,0075 ppm (для неспокойной среды) и 0,00075 ppm (для спокойной среды) при использовании десятых гармоник вспомогательных генераторов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». Соглашение о предоставлении субсидии № 075-02-2024-1533.

Библиографический список

1. Косых А. В. Адаптивная динамическая температурная компенсация уходов частоты кварцевых генераторов // Омский научный вестник. 2008. № 1 (64). С. 163–169. EDN: JVZMQL.
2. Deng X., Wang Sh., Jing Sh. [et al.]. Dynamic Frequency – Temperature Characteristic Modeling for Quartz Crystal Resonator Based on Improved Echo State Network // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. Vol. 69 (1). P. 438–446. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3118929.
3. Abramson I. Two-mode quartz resonator for digital temperature compensated quartz oscillators // Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium. 1992. P. 443–447. DOI: 10.1109/FREQ.1992.269982.
4. Benjaminson A., Stalling S. A microcomputer compensated crystal oscillator using a dual-mode resonator // Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control. 1989. P. 20–26. DOI: 10.1109/FREQ.1989.68854.
5. Watanabe Y., Sekimoto H., Goka S. [et al.]. A dual mode oscillator based on narrow-band crystal oscillators with resonator filters // Proceedings of International Frequency Control Symposium. 1997. P. 365–372. DOI: 10.1109/FREQ.1997.639211.
6. Kusters J. A., Leach J. G., Ficher M. S. Quartz resonator cut to compensate for static and dynamic thermal transient. US patent 4079280; filed June 2nd, 1976; published March 14th, 1978.
7. Гослинг В. Цифровой метод компенсации температурной нестабильности кварцевых генераторов // Электроника. 1978. № 19. С. 16–17.
8. Kaoru K., Yoshiaki M., Tsukasa K. [et al.]. High-Performance DSP-TCXO Using Twin-Crystal Oscillator // 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS). 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/FCS.2014.6859849.
9. ГОСТ 21655-87. Каналы и тракты магистральной первичной сети единой автоматизированной системы связи. Электрические параметры и методы измерений. Введ. 01–01–1989. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 106 с.
10. Чистяков А. Н. Цифровая термокомпенсация кварцевых генераторов // Радиотехника. 1983. № 7. С. 54–56.
11. Hayashi K., Yokozeki Y., Kunitomo H. The High Short-Term Frequency Stability Digitally Controlled X'tal Oscillator

with Small Size and Low Power Consumption // 2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS57587.2023.10272093.

12. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
13. Андросова В. Г., Банков В. Н., Дикиджи А. Н. [и др.]. Справочник по кварцевым резонаторам / под ред. П. Г. Познякова. Москва: Связь, 1978. 288 с.
14. Хоменко И. В., Косых А. В. Кварцевые резонаторы и генераторы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. 157 с. ISBN 978-5-8149-2583-1.
15. Peng F., Huang X., Li Y. [et al.]. Realization of Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator with Single Varactor // 2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/IFCS.2018.8597501.
16. Дворяшин Б. В. Метрология и радиоизмерения. Москва: Издат. центр Академия, 2005. 304 с.
17. Косых А. В. Кварцевые генераторы с цифровой термокомпенсацией: проблемы и перспективы реализации // Омский научный вестник. 2006. № 1 (34). С. 121–125. EDN: HTSJNN.
18. Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. В 2 кн. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во стандартов, 1990. Кн. 1. С. 1–428.

КУЛЯСОВ Сергей Михайлович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

Адрес для переписки: uchenik_11585@mail.ru

ЧЕТТЕР Денис Михайлович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: dmchetter@omgtu.ru

ЛЯШУК Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Адрес для переписки: pribor78@mail.ru

Для цитирования

Кулясов С. М., Четтер Д. М., Ляшук А. Н. Теоретическая оценка стабильности частоты сигнала цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 139–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-139-149.

Статья поступила в редакцию 16.06.2024 г.

© С. М. Кулясов, Д. М. Четтер, А. Н. Ляшук

THEORETICAL ASSESSMENT OF THE STABILITY OF A DIGITAL THERMOCOMPENSATED QUARTZ OSCILLATOR WITH TEMPERATURE SENSOR BASED ON TWO AUXILIARY QUARTZ OSCILLATORS

The article provides a theoretical limit assessment of the stability of a digital thermocompensated quartz oscillator with a temperature sensor based on two auxiliary quartz oscillators. The results are 7,5 ppb (for a restless environment) and 0,75 ppb (for a calm environment). Technical solutions are considered for obtaining a linear one-to-one dependence of the difference frequency value on temperature and increasing the steepness of this dependence. The proposed solutions allow obtaining a temperature measurement resolution of up to 0,001 °C.

Keywords: temperature sensor, quartz oscillator, thermocompensation, temperature stability, calm environment, restless environment.

Acknowledgments

The work is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal project «Training of Personnel and Scientific Foundation for Electronic Industry» of the Russian Federation State Programme «Scientific and Technological Development of the Russian Federation». Subsidy Agreement No. 075-02-2024-1533.

References

1. Kosykh A. V. Adaptivnaya dinamicheskaya temperaturnaya kompensatsiya ukhodov chastoty kvartsevykh generatorov [Adaptive dynamic temperature compensation of crystal oscillators frequency shifts] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No. 1 (64). P. 163–169. EDN: JVZMQL. (In Russ.).
2. Deng X., Wang Sh., Jing Sh. [et al.]. Dynamic Frequency – Temperature Characteristic Modeling for Quartz Crystal Resonator Based on Improved Echo State Network // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022. Vol. 69 (1). P. 438–446. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3118929. (In Engl.).
3. Abramson I. Two-mode quartz resonator for digital temperature compensated quartz oscillators // *Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium*. 1992. P. 443–447. DOI: 10.1109/FREQ.1992.269982. (In Engl.).
4. Benjaminson A., Stalling S. A microcomputer compensated crystal oscillator using a dual-mode resonator // *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*. 1989. P. 20–26. DOI: 10.1109/FREQ.1989.68854. (In Engl.).
5. Watanabe Y., Sekimoto H., Goka S. [et al.]. A dual mode oscillator based on narrow-band crystal oscillators with resonator filters // *Proceedings of International Frequency Control*

Symposium. 1997. P. 365–372. DOI: 10.1109/FREQ.1997.639211. (In Engl.).

6. Kusters J. A., Leach J. G., Ficher M. S. Quartz resonator cut to compensate for static and dynamic thermal transient. US patent 4079280; filed June 2nd, 1976; published March 14th, 1978. (In Engl.).

7. Gosling W. Tsifrovoy metod kompensatsii temperaturnoy nestabil'nosti kvartsevykh generatorov [Digital method for compensation of temperature instability of quartz oscillators] // *Elektronika. Elektronika*. 1978. No. 19. P. 16–17. (In Russ.).

8. Kaoru K., Yoshiaki M., Tsukasa K. [et al.]. High-Performance DSP-TCXO Using Twin-Crystal Oscillator // *2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS)*. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/FCS.2014.6859849. (In Engl.).

9. GOST 21655-87. Kanaly i trakty magistral'noy pervichnoy seti edinoy avtomatizirovannoy sistemy svyazi. Elektricheskie parametry i metody izmereniy [Channels and links of primary trunk network within all-union automatic communication system. Electric parameters and methods of measurement]. Moscow, 1988. 106 p. (In Russ.).

10. Chistyakov A. N. Tsifrovaya termocompensatsiya kvartsevykh generatorov [Digital thermal compensation of quartz oscillators] // *Radiotekhnika. Radiotekhnika*. 1983. No. 7. P. 54–56. (In Russ.).

11. Hayashi K., Yokozeki Y., Kunitomo H. The High Short-Term Frequency Stability Digitally Controlled X'tal Oscillator with Small Size and Low Power Consumption // *2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*. 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS57587.2023.10272093. (In Engl.).

12. Malov V. V. P'yezorezonansnyye datchiki [Piezoresonance sensors]. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow, 1989. 272 p. (In Russ.).

13. Androsova V. G., Bankov V. N., Dikidzhi A. N. [et al.]. Spravochnik po kvartsevym rezonatoram [Handbook of quartz resonators]. Moscow, 1978. 288 p. (In Russ.).

14. Khomenko I. V., Kosykh A. V. Kvartsevyye rezonatory i generatory [Quartz resonators and oscillators]. Omsk, 2018. 157 p. ISBN 978-5-8149-2583-1. (In Russ.).

15. Peng F., Huang X., Li Y. [et al.]. Realization of Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator with Single Varactor // 2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/IFCS.2018.8597501. (In Engl.).

16. Dvoryashin B. V. Metrologiya i radioizmereniya [Metrology and radio measurements]. Moscow, 2005. 304 p. (In Russ.).

17. Kosykh A. V. Kvartsevyye generatory s tsifrovoy termokompensatsiyey: problemy i perspektivy realizatsii [Quartz generators with digital thermo-compensation: problems and implementation trends] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2006. No. 1 (34). P. 121–125. EDN: HTSJNN. (In Russ.).

18. Artem'yev B. G., Golubev S. M. Spravochnoye posobiye dlya rabotnikov metrologicheskikh sluzhb. V 2 kn. [Metrology Handbook. In 2 bks.]. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow, 1990. Bk. 1. P. 1–428. (In Russ.).

KULYASOV Sergey Mikhailovich, Graduate Student of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems

Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

Correspondence address: ychenik_11585@mail.ru

CHETTER Denis Mikhailovich, Graduate Student of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: dmchetter@omgtu.ru

LYASHUK Aleksey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1635-6235

AuthorID (RSCI): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Correspondence address: pribor78@mail.ru

For citations

Kulyasov S. M., Chetter D. M., Lyashuk A. N. Theoretical assessment of the stability of a digital thermocompensated quartz oscillator with temperature sensor based on two auxiliary quartz oscillators // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 139–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-139-149.

Received June 16, 2024.

© S. M. Kulyasov, D. M. Chetter, A. N. Lyashuk