

УДК 621.3.087.92

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-9-19

## Применение пассивных время-импульсных преобразователей в системах измерения температуры подвижных объектов

*В. А. Куликов*, доктор технических наук, профессор, УдГУ, Ижевск, Россия

*В. Н. Сяктерев*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. В. Сяктерева*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрен вариант реализации время-импульсного преобразователя в составе системы измерений температуры человека, в котором формирующая информационный временной интервал цепь первого порядка образована термопреобразователем сопротивления и конденсатором. Инициализация и регистрация длительности переходного процесса осуществляются МДП-ключами и интегральным компаратором. Дана оценка дифференциальной чувствительности преобразователя в зависимости от постоянной времени формирующей цепи для ключей среднего быстрого действия. Представлена схема многоканального преобразователя, в которой последовательно циклически осуществляется преобразование сопротивления нескольких термопреобразователей в длительность выходных импульсных сигналов. При этом для дешифрирования номера измерительного канала циклы преобразований разделены паузами.*

*Для никелевого термопреобразователя сопротивления на основе эквивалентной электрической схемы время-импульсного преобразователя выведена функция преобразования температуры в длительность временного интервала. Получены аналитические выражения для оценки влияния неидеальностей элементов схемы и дестабилизирующих факторов на погрешность измерений температуры. Определены условия его снижения.*

*В среде схемотехнического моделирования Micro-Cap исследована схема преобразователя. Расхождения экспериментальных и расчетных значений функции преобразования не превысили 0,2 %. Температурная нестабильность выходных информационных интервалов ВИП составила не более 0,1 % в диапазоне температуры эксплуатации 0...50 °С и обусловлена температурным дрейфом напряжения смещения компаратора.*

*Применение пассивного время-импульсного преобразователя целесообразно в телеметрических системах измерения температуры или других физических величин с первичными преобразователями сопротивления, емкости или индуктивности, образующими в тракте преобразования цепь первого порядка. Представленные аналитические выражения могут быть использованы для оценки дополнительной погрешности измерений.*

**Ключевые слова:** измерение температуры, термопреобразователь сопротивления, время-импульсный преобразователь.

### Введение

Время-импульсные преобразователи (ВИП) осуществляют преобразование измеряемой аналоговой величины в параметр импульсных сигналов. Как правило, выходной величиной ВИП является длительность, период или частота импульсов. ВИП подразделяются на пассивные и активные. В первом случае в тракте преобразования отсутствуют усилительные элементы, например операционные усилители (ОУ), во втором случае, наоборот, применяются ОУ, которые осуществляют не только усиление сигнала, но и выполняют функции его преобразования, например интегрирование и др. [1–5].

ВИП широко применяются в измерительной технике. Актуальность их разработки и использования имеет место в системах, к которым предъявляются специфические требования, обусловленные особенностями применения. Так, актуальны применения ВИП в телеметрических системах, обеспечивающих измерение параметров подвиж-

ных объектов. В таких системах ВИП размещается вместе с первичными преобразователями на подвижном объекте и входит в состав аналого-цифрового преобразователя системы, другая часть которого устанавливается стационарно во вторичной аппаратуре. Связь между ВИП и вторичной аппаратурой осуществляется бесконтактно по радио или оптическому каналу [6]. Информация в канале связи кодируется в длительности, периоде или частоте импульсных сигналов.

В данной статье рассматривается схемотехника ВИП, предназначенных для измерения температуры подвижных объектов в диапазоне 0...50 °С с разрешением на уровне десятых долей градуса. При этом предполагается, что в процессе эксплуатации может также изменяться температура электроники ВИП в этом же диапазоне. Применение относится к системам медицинского назначения, предназначенным для исследования температурных параметров и температурной диагностики человека в движении.

Цель статьи – обоснование применения пассивных ВИП в системах измерения параметров подвижных объектов при наличии неидеальностей элементов схемы и воздействии дестабилизирующих факторов.

### Принцип пассивного время-импульсного преобразования

В основе принципа действия пассивных ВИП лежит апериодический переходный процесс, возникающий в резистивно-индуктивных или резистивно-емкостных цепях первого порядка при скачкообразном изменении входного электрического воздействия [7–9]. Особенностью пассивных ВИП является применение для инициализации (возбуждения) переходного процесса коммутирующих элементов на основе МДП-структур и интегральных компараторов, фиксирующих окончание процесса преобразования [10, 11]. С помощью ВИП осуществляется преобразование сопротивления, емкости или индуктивности в длительность временного интервала или частоту следования электрических импульсов.

На рис. 1 представлена схема, иллюстрирующая принцип действия пассивного ВИП с резистивно-емкостной формирующей цепью.

Если в исходном состоянии ключ  $S_1$  был замкнут, а  $S_2$  разомкнут, то конденсатор  $C_0$  перед началом преобразования находился в заряженном до напряжения  $E$  состоянии, и на выходе компаратора  $A_1$  существовал низкий уровень напряжения. Процесс преобразования начинается с одновременным изменением состояния ключей  $S_1, S_2$  на противоположное. При этом конденсатор разряжается через резистор  $R_x$  и ключ  $S_2$ . Как только напряжение на нем уменьшается до значения  $U_{оп}$ , происходит переключение компаратора и выходное напряжение последнего принимает значение высокого уровня, что свидетельствует об окончании преобразования.

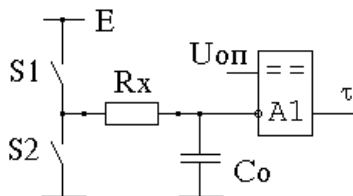


Рис. 1. Функциональная схема резистивно-емкостного ВИП

Fig. 1. Functional diagram of a time-to-pulse converter

В идеальном случае временной интервал между моментами изменения состояния ключей и переключения компаратора, являющийся выходной величиной преобразователя, может быть

найден из закона изменения напряжения на конденсаторе

$$\tau_{\text{вых}} = \tau_0 \ln \left( \frac{E}{U_{\text{оп}}} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_0 = R_x C_0$  – постоянная времени экспоненты.

Из выражения (2) следует, что длительность интервала  $\tau_{\text{вых}}$  прямо пропорциональна постоянной времени  $\tau_0$  и, следовательно, каждой из величин, входящих в выражение для  $\tau_0$ . Таким образом, если в качестве  $R_x$  использовать, например, термопреобразователь сопротивления (ТПС), то можно производить преобразование температуры в длительность временного интервала.

В реальном случае зависимость временного интервала от постоянной  $\tau_0$  не соответствует выражению (2), т. к. быстроедействие электронных ключей ограничено и длительность их переключения не равна нулю. Представив источник напряжения  $E$  с электронными ключами в виде эквивалентного источника с экспоненциальной зависимостью выходного напряжения от времени, выражение для напряжения на конденсаторе  $C_0$  ВИП можно найти в виде

$$U(\tau) = E \left( \frac{\tau_0}{\tau_0 - \tau_1} e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} - \frac{\tau_1}{\tau_0 - \tau_1} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} \right), \quad (3)$$

где  $\tau_1$  – постоянная времени экспоненты выходного напряжения эквивалентного источника.

Выражение (3) не имеет аналитического решения относительно времени  $\tau$ . Поэтому для анализа зависимости  $\tau$  от  $\tau_0$  был произведен численный расчет при пороге срабатывания компаратора

$$U_{\text{оп}} = E e^{-1}, \quad (4)$$

который является оптимальным с точки зрения минимизации погрешности от напряжения смещения и дрейфа компаратора [9]. Уравнение (3) было приведено к виду

$$e^{-1} = \frac{\tau_0}{\tau_0 - \tau_1} e^{-\frac{\tau_{\text{вых}}}{\tau_0}} - \frac{\tau_1}{\tau_0 - \tau_1} e^{-\frac{\tau_{\text{вых}}}{\tau_1}}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета для  $\tau_1 = 0,3$  мкс, что соответствует МДП – ключам среднего быстрогодействия [12]. При  $\tau_0 \gg \tau_1$  реальный график (1) зависимости, рассчитанный по формуле (5), смещен относительно идеального (2), соответствующего формуле (2), на

постоянную величину  $\tau_1$  при одинаковом пороге срабатывания компаратора.

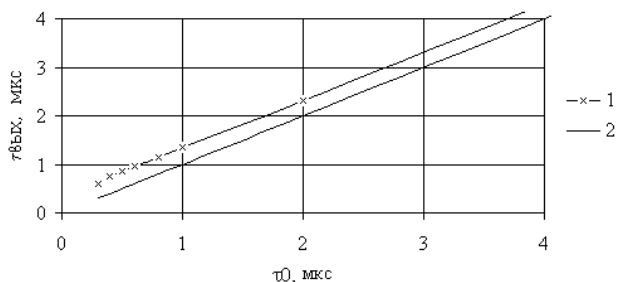


Рис. 2. Зависимость выходного интервала ВИП от постоянной времени  $\tau_0$

Fig. 2. Dependence of output interval of time-to-pulse converter on the time constant  $\tau_0$

При малых значениях  $\tau_0$  происходит снижение дифференциальной чувствительности ВИП, график которой представлен на рис. 3. Таким образом, быстродействие ключевых элементов ограничивает минимальное значение выходного интервала ВИП и, следовательно, минимальное время преобразования.

ВИП с МДП-ключами подразделяются на две группы: с внешним возбуждением и генераторного типа.

В первом случае ключами управляет цифровой блок, представляющий собой генератор паразитных импульсов с длительностью полупериодов, превышающей длительность генерируемых ВИП максимальных временных интервалов.

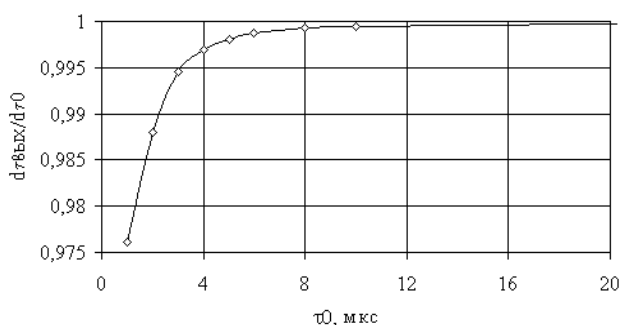


Рис. 3. Зависимость дифференциальной чувствительности ВИП от постоянной времени  $\tau_0$

Fig. 3. Dependence of differential sensibility of time-to-pulse converter on the time constant  $\tau_0$

В схеме генераторного типа сигналы управления ключами формируются цифровым блоком, управляемым выходным сигналом компаратора таким образом, что реализуется цифровая обратная связь. Периодичность преобразований в этом

случае становится зависимой от длительности преобразований. При уменьшении информационных интервалов период преобразования уменьшается.

В современных схемах пассивных ВИП, применяемых для измерения неэлектрических величин, времязадающая цепь и цепь, формирующая пороговое напряжение компаратора, образуют резистивно-емкостный или резистивно-индуктивный мост. Различаются симметричные мосты, с двумя конденсаторами (или двумя индуктивностями) и двумя резисторами, и несимметричные мосты, содержащие только один реактивный элемент.

Ориентируясь на применение ВИП в системах измерения температуры с термопреобразователями сопротивления (ТПС), в настоящей статье рассмотрена схема с несимметричным измерительным мостом и одним конденсатором.

**Многоканальный время-импульсный преобразователь с внешним возбуждением**

Функциональная схема и временные диаграммы трехканального ВИП с внешним возбуждением представлены на рис. 4, а, б. ВИП содержит резистивно-емкостный мост, в состав которого входят конденсатор  $C_1$ , один из термопреобразователей сопротивления  $R_1...R_{i3}$ , образующий с конденсатором времязадающую цепь, и два резистора  $R_1$  и  $R_2$ . Цифровой блок, управляющий ключами коммутатора  $A_2$ , представляет собой генератор фазных импульсов, выполненный на элементах  $A_1$ ,  $D_1$  и  $D_2$ . На элементах  $A_3$  и  $D_3$  реализован стробируемый компаратор напряжения. Возможно другое включение конденсатора в схему (между входом компаратора и общим проводом). При этом ТПС могут быть подключены как к общему проводу, так и к шине питания  $E$ .

Цикл работы ВИП (рис. 4, а) содержит  $2(n+1)$  тактов перезаряда конденсатора, где  $n=3$  – число измерительных каналов с поочередным включением термопреобразователей во времязадающую цепь. При этом заряд конденсатора в каждом такте осуществляется через один из открытых ключей  $X_0...X_2$  и соответствующий ТПС  $R_i$ , а разряд – через открытый ключ  $X_3$  и резистор  $R_0$ , который, в принципе, может отсутствовать в схеме. Временные информационные интервалы  $\tau_{вых0}... \tau_{вых3}$ , нумерация которых соответствует нумерации ключей коммутатора, формируются в процессе заряда конденсатора от момента размыкания

ключа  $X_0$  и замыкания одного из коммутирующих ТПС ключей до момента срабатывания компаратора при достижении равенства напряжений  $U_a = U_{оп}$ . Временной интервал  $\tau_{вых3}$  соответствует длительности импульса на выходе генератора  $G$  цифрового блока и как информационный не используется. В процессе его формирования перезаряда конденсатора не происходит. Устойчивое бездребезговое переключение компаратора обеспечивается положительной обратной связью по шине питания за счет резистора  $R_3$ .

Для дешифрирования номера информационного интервала (измерительного канала) в схеме введен сигнал СТРОБ, высоким уровнем которого в течение полупериода работы устройства блокируется формирование информационных им-

пульсов на выходе ВИП. Таким образом, отсутствие импульсов в течение относительно протяженного интервала времени используется для обозначения начала цикла преобразования; номер информационного канала определяется по номеру импульса в цикле. Другой порядок опроса измерительных каналов может быть получен путем изменения логики работы цифрового блока.

Эквивалентная электрическая схема ВИП с внешним возбуждением представлена на рис. 5.

В схеме приняты обозначения:  $R_{кот}$ ,  $R_{кз}$  – сопротивления ключей коммутатора в открытом (замкнутом) и закрытом (разомкнутом) состояниях;  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_{см}$  – входные токи и напряжение смещения компаратора;  $E_k$  – выходное напряжение компаратора;  $R_r$  – внутреннее сопротивление источника питания  $E$ .

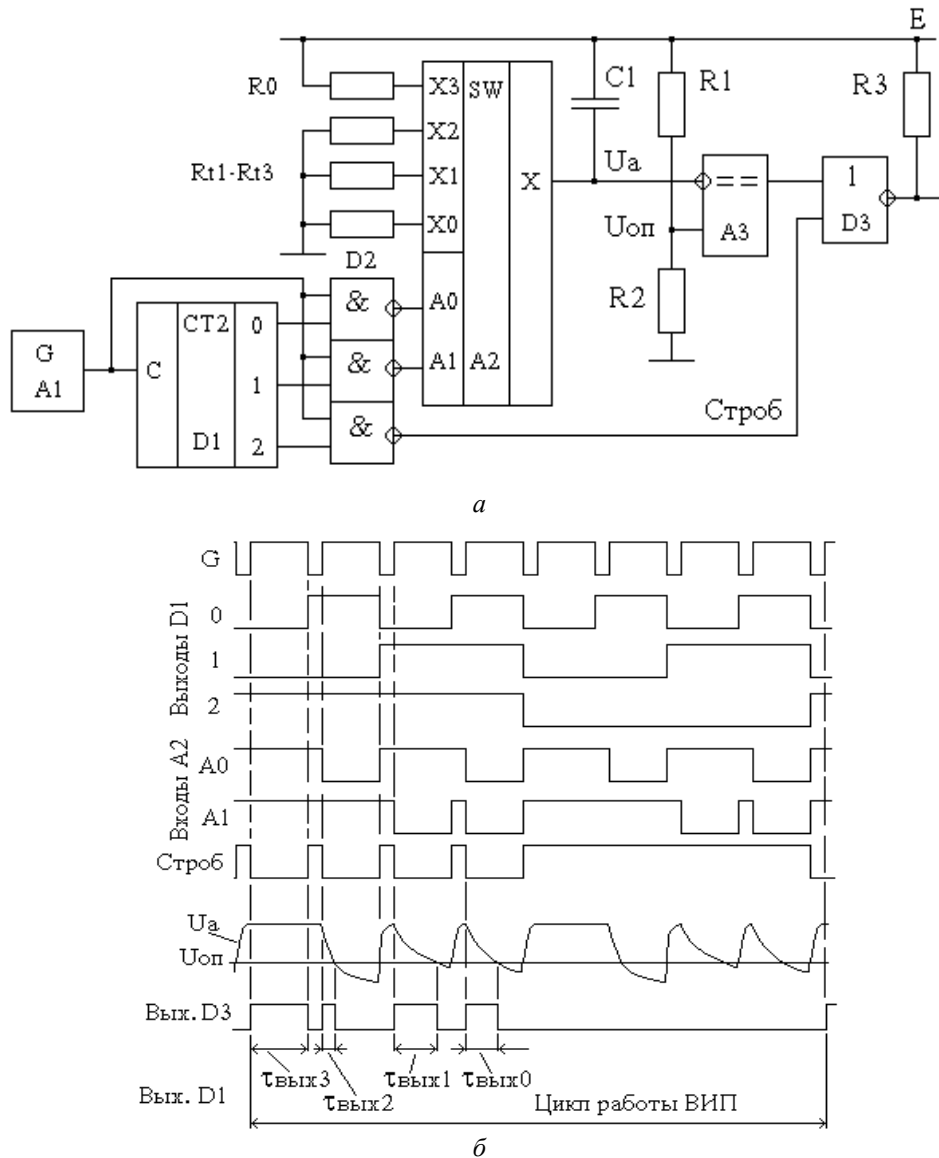


Рис. 4. Схема (а) и временные диаграммы (б) многоканального ВИП с внешним возбуждением

Fig. 4. Scheme (a) and time diagrams (b) of a multichannel time-to-pulse converter with external excitation

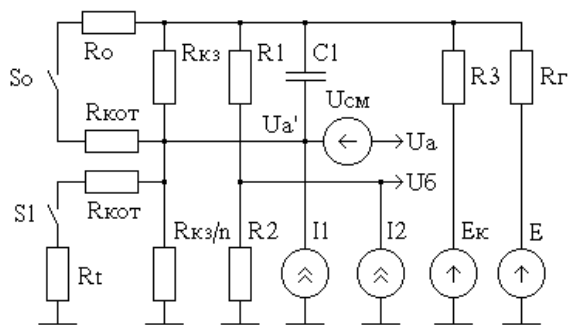


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема ВИП с внешним возбуждением

Fig. 5. Equivalent electrical circuit of a time-to-pulse converter with external excitation

Начальное значение напряжения  $U'_a$  в схеме в такте преобразования определяется при открытом  $S_0$  и закрытом  $S_1$  ключах:

$$U_1 = \frac{E + R_{\text{кот}} I_1}{1 + n \frac{R_{\text{кот}}}{R_{\text{кз}}}} \quad (4)$$

Асимптота напряжения  $U'_a$  находится при другом состоянии ключей:

$$U_0 = \frac{E + R_{\text{кз}} I_1}{1 + n + \frac{R_{\text{кз}}}{R_{\text{кот}} + R_t}} \quad (5)$$

Значение напряжения  $U'_a$ , при котором происходит срабатывание компаратора, обозначающее окончание процесса формирования информационного интервала, может быть найдено в виде

$$U_{\text{ср}} = \frac{E + R_1 I_2}{\frac{R_1}{R_2} + 1} + U_{\text{см}}, \quad (6)$$

а постоянная времени экспоненциального процесса и длительность выходного информационного интервала записаны соответственно как

$$\tau_3 = C_1 \frac{\frac{R_{\text{кз}}}{n+1} (R_{\text{кот}} + R_t)}{\frac{R_{\text{кз}}}{n+1} + R_{\text{кот}} + R_t} \quad (7)$$

и

$$\tau_{\text{вых}} = \tau_3 \text{Ln} \left( \frac{U_1 - U_0}{U_{\text{ср}} - U_0} \right) \quad (8)$$

Проведем исследование схемы восьмиканального ВИП при следующих исходных данных. Используем коммутатор 564КП2, компара-

тор 521СА3, конденсатор емкостью  $C_1 = 4$  нф. Соотношение сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  выберем таким, чтобы выполнялось условие оптимальности с точки зрения минимизации погрешности от входных неидеальностей компаратора [9]:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = e, \quad (9)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма. В качестве материала ТПС используем никель с температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha = 0,00617 \text{ K}^{-1}$  [ГОСТ 6651–2009].

В результате экспериментальных исследований компонентов электронных схем [10, 13] установлено, что зависимость сопротивления канала открытого коммутатора 564КП2 от температуры  $T$  в диапазоне от 0 до 100 °С может быть аппроксимировано выражением

$$R_{\text{кот}} = \left( \frac{K_E}{E} + R_{\text{кн}} \right) [1 + \text{ТКС}_k (T - 20)], \quad (10)$$

где  $K_E = 500 \text{ Ом} \cdot \text{В}$  – коэффициент влияния напряжения питания;  $R_{\text{кн}} = 75 \text{ Ом}$  – начальное сопротивление открытого канала;  $\text{ТКС}_k = 175 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления открытого канала. Сопротивление канала закрытого коммутатора  $R_{\text{кз}}$  имеет значение не менее  $10^9 \text{ Ом}$ . Входные токи компаратора  $I_1$  и  $I_2$  не превышают 20 нА и отличаются не более, чем на 2 нА, а напряжение дрейфа составляет 30 мкВ/К.

На рис. 6 представлена полученная расчетным путем зависимость относительной дифференциальной чувствительности ВИП

$$S = \frac{\frac{\partial \tau_{\text{вых}}}{\partial R_t}}{\frac{\partial \tau_{\text{вых}}}{\partial R_t} \Big|_{R_t=0}} \quad (11)$$

от сопротивления  $R_t$  ТПС. При сопротивлении ТПС более 100 кОм наблюдается существенное шунтирующее влияние закрытых каналов коммутаторов, что ведет к снижению дифференциальной чувствительности и к появлению нелинейности функции преобразования ВИП. Расширение диапазона линейности в сторону увеличения  $R_t$  может быть достигнуто за счет уменьшения количества каналов и выбора коммутаторов с более высоким значением  $R_{\text{кз}}$ .

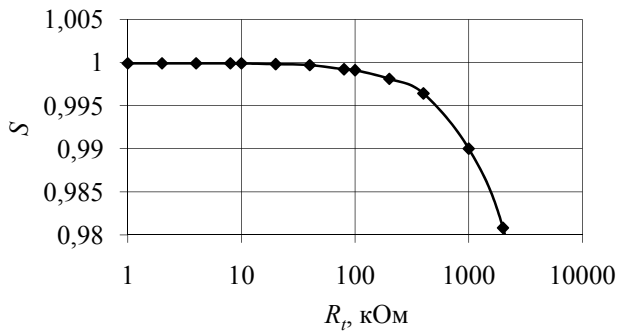


Рис. 6. Зависимость относительной дифференциальной чувствительности ВИП с внешним возбуждением от сопротивления ТПС

Fig. 6. The dependence of the relative differential sensitivity of the time-to-pulse converter with external excitation on the resistance of the resistance temperature device

Расчет также показал, что входные токи компаратора  $I_1$  и  $I_2$  не оказывают существенного влияния на погрешность преобразования, поэтому в дальнейшем их значения принимаются равными нулю. Не будем также учитывать  $R_{кз}$ , полагая  $R_t < 100$  кОм.

Для исследования влияния напряжения смещения на погрешность измерения температуры найдем чувствительность  $\frac{\partial T}{\partial U_{см}}$ , для чего запишем функцию преобразования ВИП с учетом принятых допущений:

$$\tau_{вых} = C_1 (R_{кот} + R_t) \text{Ln} \left( \frac{E}{\frac{ER_2}{R_1 + R_2} + U_{см}} \right), \quad (12)$$

где  $R_t = R_{t0}(1 + \alpha T)$ , и найдем производные

$$\frac{\partial \tau_{вых}}{\partial U_{см}} = - \frac{1}{\frac{ER_2}{R_1 + R_2} + U_{см}}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tau_{вых}}{\partial T} = C_1 R_{t0} \alpha \text{Ln} \left( \frac{E}{\frac{ER_2}{R_1 + R_2} + U_{см}} \right). \quad (14)$$

Поделив (13) на (14), получаем

$$\frac{\partial T}{\partial U_{см}} = \frac{R_{кот} + R_{t0}(1 + \alpha T)}{\alpha R_{t0} \left( \frac{ER_2}{R_1 + R_2} + U_{см} \right) \text{Ln} \left( \frac{\frac{ER_2}{R_1 + R_2} + U_{см}}{E} \right)}. \quad (15)$$

Поскольку минимальное значение  $E$  определяется минимальным напряжением питания коммутатора и составляет 9 В, то, учитывая соотношение (9), значением  $U_{см}$  в выражении (4) можно пренебречь. Тогда логарифм в выражении (15) принимает значение  $-1$ . При этом, поскольку наихудший случай соответствует максимальной измеряемой температуре  $T_m$ , при которой  $R_t \gg R_{кот}$ , то значением  $R_{кот}$  также можно пренебречь. Тогда выражение (15) принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial U_{см}} = - \frac{(1 + \alpha T_m)e}{\alpha E}. \quad (16)$$

Для представленных выше исходных данных при максимальной измеряемой температуре  $T_m = 50$  °С и напряжении питания  $E = 9$  В расчет чувствительности по формуле (16) дает значение  $\frac{\partial T}{\partial U_{см}} = -79,2$  К/В.

Если принять диапазон температур эксплуатации ВИП, например  $\Delta T_3 = \pm 10$  К, то при дрейфе компаратора 30 мкВ/К изменение напряжения смещения будет составлять  $\Delta U_{см} = \pm 0,3$  мВ, что дает погрешность измерения температуры  $\Delta T = \pm 0,048$  К.

Таким образом, благодаря относительно большому значению напряжения питания схемы влияние напряжения смещения компаратора оказывается небольшим. Дальнейшее его снижение может быть достигнуто при увеличении напряжения питания  $E$  до максимально допустимого значения.

Для исследования влияния напряжения питания на погрешность измерения температуры примем  $U_{см} = 0$  и найдем чувствительность  $\frac{\partial T}{\partial E}$ .

Исходную функцию (12) преобразования ВИП запишем в виде

$$\tau_{вых} = C_1 \left( \frac{K_E}{E} + R_{кн} + R_{t0}(1 + \alpha T) \right) \text{Ln} \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (17)$$

и найдем производные

$$\frac{\partial \tau_{\text{вых}}}{\partial E} = -\frac{C_1 K_E}{E^2} \ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right), \quad (18)$$

$$\frac{\partial \tau_{\text{вых}}}{\partial T} = C_1 R_{t0} \alpha \ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right). \quad (19)$$

Поделив (18) на (19), получаем чувствительность информационных интервалов ВИП, представленных в терминах температуры, к изменению напряжения питания:

$$\frac{\partial T}{\partial E} = -\frac{K_E}{\alpha R_{t0} E^2}. \quad (20)$$

Для представленных выше данных формула (20) может быть конкретизирована:

$$\frac{\partial T}{\partial E} = -\frac{81037}{R_{t0} E^2} \text{ [К/В]}. \quad (21)$$

Отсюда для  $R_{t0} = 1$  кОм и  $E = 10$  В имеем  $\frac{\partial T}{\partial E} = -0,81$  К/В. Таким образом, вследствие зависимости сопротивления открытого канала коммутатора от напряжения питания наблюдается зависимость временного информационного интервала ВИП от напряжения питания, что требует его стабилизации.

Рассмотрим зависимость длительности временного интервала от температуры эксплуатации ВИП.

Длительность генерируемого интервала может быть записана в виде

$$\tau_{\text{вых}} = k(R_t + R_{\text{кот}})C_1, \quad (22)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент.

Нестабильность временного интервала без учета слагаемых высоких порядков может быть представлена как [13]

$$\Delta \tau_{\text{вых}} = k[(R_t + R_{\text{кот}})\Delta C_1 + C_1 \Delta R_{\text{кот}}], \quad (23)$$

а чувствительность к измеряемой температуре как

$$K_1 = \frac{\partial \tau_{\text{вых}}}{\partial T} = kC_1 \gamma, \quad (24)$$

где  $\gamma$  – чувствительность ТПС к измеряемой температуре в Ом/К.

Тогда погрешность измерений температуры, обусловленную температурной нестабильностью временного интервала, можно определить в виде

$$\Delta T = \frac{\Delta \tau}{K_1} = \frac{(R_{t0} + R_{\text{кот}})\Delta C_1 + C_1 \Delta R_{\text{кот}}}{\gamma C_1} + \frac{\Delta C_1}{C_1} T. \quad (25)$$

Как следует из выражения (25), существуют аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности. Это означает, что полная компенсация температурного дрейфа преобразователя возможна только в одной точке диапазона измеряемых температур [14, 15]. Для устранения аддитивной составляющей необходимо, чтобы числитель первого слагаемого был равен нулю. Отсюда можно определить требуемое значение температурного коэффициента емкости ТКЕ задающего конденсатора. Из выражения (25) и определения ТКЕ соответственно имеем

$$\Delta C_1 = -\frac{C_1 \Delta R_{\text{кот}}}{R_{t0} + R_{\text{кот}}}; \quad (26)$$

$$\Delta C_1 = \text{ТКЕ} \cdot C_1 \Delta T_s, \quad (27)$$

где  $\Delta T_s$  – изменение температуры эксплуатации. Приравняв правые части (26) и (27), получаем

$$\text{ТКЕ} = -\frac{\Delta R_{\text{кот}}}{R_{t0} + R_{\text{кот}}} \frac{1}{\Delta T_s}, \quad (28)$$

и далее, полагая линейной зависимость сопротивления каналов коммутаторов от температуры, находим

$$\text{ТКЕ} = -\frac{R_{\text{кот}}}{R_{t0} + R_{\text{кот}}} \text{ТКС}, \quad (29)$$

где ТКС – температурный коэффициент сопротивления каналов.

Пример. Пусть  $R_{t0} = 1$  кОм,  $C_1 = 10$  нф,  $R_{\text{кот}} = 80$  Ом,  $\Delta R_{\text{кот}} = 1,4$  Ом при  $\Delta T_s = \pm 10$  °С. Отсюда

$$\text{ТКС} = \frac{\Delta R_{\text{кот}}}{R_{\text{кот}} \Delta T_s} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}. \quad (30)$$

Используя выражение (29), находим  $\text{ТКЕ} = -130 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Ближайший номинал  $\text{ТКЕ} = -150 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  [16, 17]. Мультипликативная составляющая погрешности в этом случае составит

$$\Delta T = \frac{\Delta C_1}{C_1} T = 0,0013 T. \quad (31)$$

Если задать предел погрешности  $\Delta T$  на уровне 0,1 К, то предел измеряемой температуры относительно средней будет составлять

$$T_m = \frac{\Delta T}{0,005} = \frac{0,1}{0,0013} = \pm 75 \text{ К.} \quad (32)$$

Для того чтобы использовать термокомпенсированный преобразователь в другом (асимметричном относительно нуля) диапазоне измеряемой температуры, например  $35 \pm 20$  °С, что соответствует медицинским применениям, необходимо расчет ТКЕ конденсатора с использованием формулы (29) вести для  $R_i$ , соответствующего температуре 35 °С.

Расширение диапазона измерений может быть достигнуто выбором оптимальных значений допустимой погрешности  $\Delta T$ , диапазона температур эксплуатации  $\Delta T_{\Sigma}$  время-импульсного преобразователя и номинального сопро-

тивления термопреобразователя  $R_{i0}$  с использованием выражения

$$\Delta T = \frac{R_{\text{кот}} \text{ТКС}}{R_{i0} + R_{\text{кот}}} \Delta T_{\Sigma} T_m, \quad (33)$$

которое получено путем подстановки формул (27) и (29) в выражение (31).

#### Компьютерное моделирование время-импульсного преобразователя

Исследование свойств ВИП проводилось путем постановки модельного компьютерного эксперимента в среде Micro-Cap.

Исследуемая схема построена на основе эквивалентной схемы (рис. 5) и представлена на рис. 7.

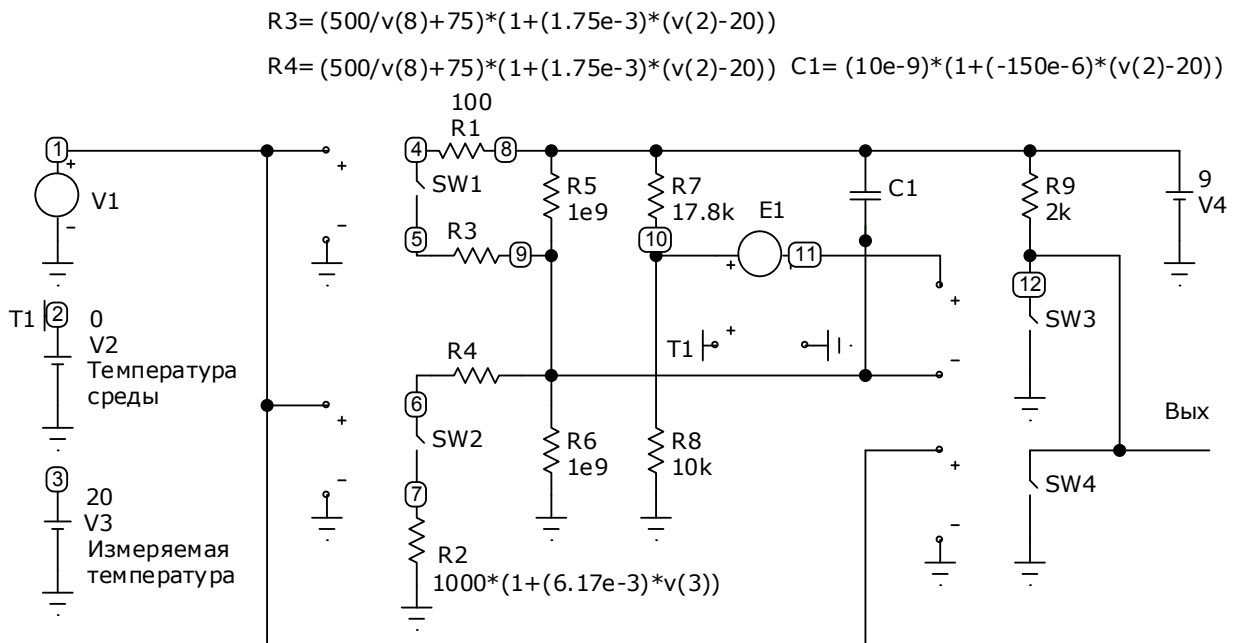


Рис. 7. Модель ВИП в формате программы Micro-Cap

Fig. 7. Time-to-pulse converter model in the format of the Micro-Cap program

Здесь источник импульсного напряжения V1 является задающим генератором ВИП, который управляет ключами SW1 и SW2. Ключи вместе с резисторами R3–R6 представляют собой макромодель управляемой (аналоговой) части коммутатора. При этом R3 и R4 моделируют сопротивления открытых каналов, а R5 и R6 – сопротивления закрытых каналов коммутатора; R7, R8 образуют резистивную часть измерительного моста ВИП.

Тепловое воздействие на элементы схемы ВИП моделируется на основе метода электротепловой аналогии с использованием зависимых резисторов, конденсаторов и источников напряжения библиотеки Micro Cap. В схеме учте-

ны температурные зависимости термопреобразователя сопротивления R2, сопротивления открытых каналов коммутатора R3 и R4 и емкости конденсатора C1 измерительного моста. Также с помощью зависимого источника напряжения учтено напряжение дрейфа компаратора. При этом с помощью источников напряжения V2 и V3 моделируется температура окружающей среды и измеряемая температура объекта. Строблируемый компаратор представлен двумя идеальными ключами SW3 и SW4. Зависимости других элементов эквивалентной схемы ВИП от температуры приняты незначительными и не учитываются.



На рис. 8 представлены временные диаграммы напряжений в точках схемы, иллюстрирующие работу ВИП, на рис. 9 показана зависи-

мость длительности временных интервалов выходных импульсных сигналов от измеряемой температуры, полученные в Micro Cap.

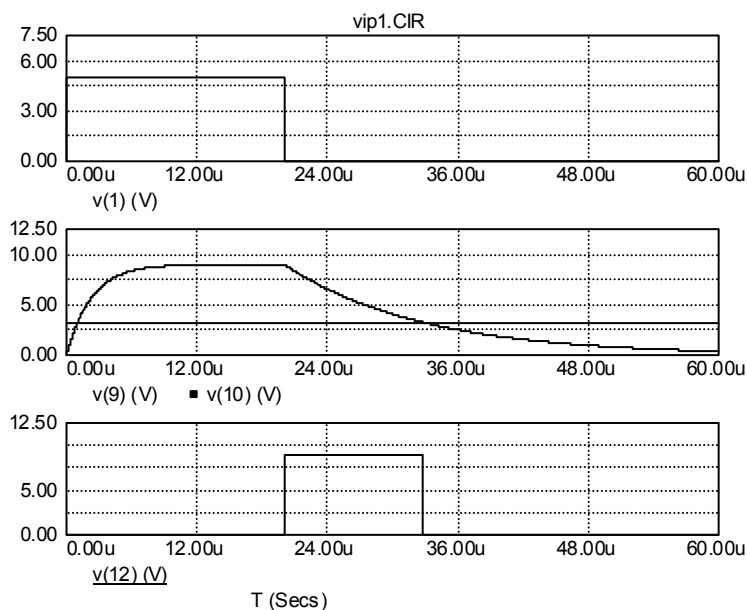


Рис. 8. Временные диаграммы напряжений в схеме ВИП

Fig. 8. Voltage timing diagram in scheme of the time-to-pulse converter

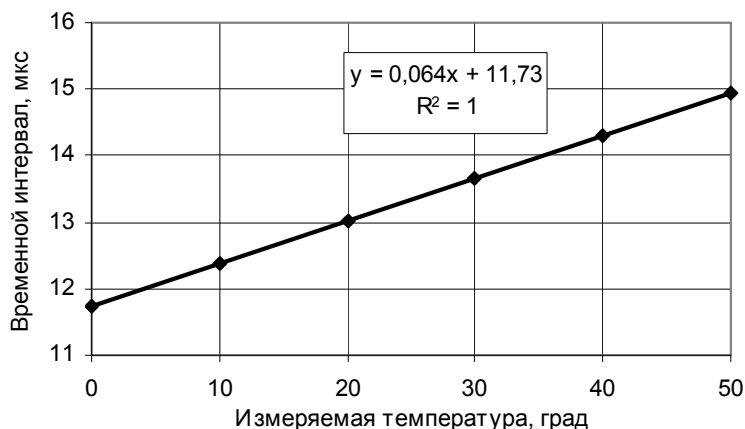


Рис. 9. Зависимость длительности выходных импульсов ВИП от измеряемой температуры

Fig. 9. Dependence of the duration of the output pulses of the time-to-pulse converter on the measured temperature

Моделирование в Micro Cap показало высокую степень совпадения результатов с расчетными значениями. Расхождения экспериментальных и расчетных значений функции преобразования ВИП с никелевым термопреобразователем сопротивления не превысили 0,2 %. Температурная нестабильность выходных информационных интервалов ВИП составила не более 0,1 % в диапазоне температуры эксплуатации 0...50 °C и обусловлена температурным дрейфом напряжения смещения компаратора.

### Заключение

Применение пассивного время-импульсного преобразователя целесообразно в телеметрических системах измерения температуры или других физических величин с первичными преобразователями сопротивления, емкости или индуктивности, образующими в тракте преобразования цепь первого порядка. Представленные аналитические выражения могут быть использованы для оценки дополнительной погрешности измерений.

### Библиографические ссылки

1. Волович Г. И., Мунтянов С. Н. Оценка температурной нестабильности высоковольтного емкостного делителя напряжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16, № 3. С. 152–158. DOI: 10.14529/ctcr160317.
2. Патент на изобретение № RU 2689805 С1, МПК H03K3/13, G05F 1/00 Время-импульсный универсальный интегрирующий преобразователь напряжения / Кук И.А. (RU), Сафиков Ш.С. (RU). Заявл. 06.08. 2018 № 2018128886. Оpubл. 29.05. 2019. Бюл. № 16.
3. Куликов, В. А., Сяктерев В. Н., Колеватов С. М. Многоканальный импульсный преобразователь температуры // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. № 4 (68). С. 47–49.
4. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
5. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 254–261. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261.
6. Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В., Колеватов С. М. Оптический канал связи в системах измерения параметров поршня двигателя внутреннего сгорания // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. № 3 (71) С. 44–46.
7. Димитраки П. И. Импульсные устройства с мостовыми времязадающими цепями на интегральных схемах. Кишинев : Штинница, 1977. 124 с.
8. Ильин В. А. Импульсные устройства с мостовыми времязадающими цепями. М. : Энергия, 1972. 232 с.
9. Функциональные устройства на микросхемах / В. З. Найденев, А. И. Голованов, З. Ф. Юсупов и др. М. : Радио и связь, 1985. 200 с.
10. Куликов В. А., Сяктерев В. Н., Васильев И. А. Идентификация системы измерения температуры инерционного объекта // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2013. № 4 (60). С. 103–106.
11. А. с. 1626832 (СССР), МКИ G 01 K 13/04. Многоканальное устройство для измерения температуры движущегося объекта / В. А. Куликов, В. Н. Сяктерев (СССР). № 4724484 10; Заявл. 28.07.89. Оpubл. 10.11. 2005, бюл. № 31.
12. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Нисельсон, В. И. Кулешов и др. ; под ред. С. В. Якубовского. М. : Радио и связь, 1990. 496 с.
13. Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В., Акчурин И. С. Исследование возможности применения микроконтроллеров PIC в системе термометрирования поршня двигателя внутреннего сгорания // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2013. № 2 (58). С. 105–108.
14. Metrology model of measuring channel in multi-channel data-measurement system Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V., Grishko A.K. In 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings. 2020. С. 9261527. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261527.
15. Куликов В. А. Температурная компенсация в дискретно – аналоговом промежуточном преобразователе // Избранные научные записки. В 3 т. Т. 2. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1998. С. 94–96.
16. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник / Н. Н. Акимов, Е. П. Ващуков, В. А. Прохоренко, Ю. П. Ходоренок. Мн. : Беларусь, 1994. 591 с.
17. Каталог продукции «ГИРИКОНД» «Электронные компоненты и приборы». Санкт-Петербург, РОСЭЛ, 2021. 228 с.

### References

1. Volovich G.I., Munt'yanov S.N. [Evaluation of temperature instability of a high-voltage capacitive voltage divider]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 152–158 (in Russ.). DOI: 10.14529/ctcr160317.
2. Kuk I.A. (RU), Safikov Sh.S. *Vremja–impul'snyj universal'nyj integrirujushhij preobrazovatel' naprjazhenija* [Time–pulse universal integrating voltage converter]. Patent RF, no. 2689805, 2019.
3. Kulikov V.A., Sjakterev V.N., Kolevatov S.M. [Multi-channel pulse temperature converter]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2015, no. 4 (68), pp. 47–49 (in Russ.).
4. Gutnikov V.S. *Integral'naja jelektronika v izmeritel'nyh ustrojstvah* [Integrated electronics in measuring devices]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1988, 304 p. (in Russ.)
5. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P.S. [Multi-channel temperature converter]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 254–261 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261.
6. Sjakterev V.N., Sjaktereva V.V., Kolevatov S.M. [Optical communication channel in internal combustion engine piston measurement systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, no. 3 (71), pp. 44–46 (in Russ.).
7. Dimitraki P.I. *Impul'snye ustrojstva s mostovymi vremjazadajushhimi cepjami na integral'nyh shemah* [Pulse devices with bridge time-lapse circuits on integrated circuits]. Chisinau, Shtinnica Publ., 1977, 124 p. (in Russ.).
8. Il'in V.A. *Impul'snye ustrojstva s mostovymi vremjazadajushhimi cepjami* [Pulse devices with bridge time-lapse circuits]. Moscow, Jenergija Publ., 1972, 232 p. (in Russ.).
9. Najdenov V.Z., Golovanov A.I., Jusupov Z.F. i dr. *Funkcional'nye ustrojstva na mikroshemah* [Functional devices on microchips]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1985, 200 p. (in Russ.).
10. Kulikov V.A., Syakterev V.N., Vasil'ev I.A. [Identification of the Measurement System of Inertia

Object Temperature]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2013, no. 4, pp. 103-106 (in Russ.).

11. Kulikov V.A., Syakterev V.N. *Mnogokanal'noe ustroystvo dlya izmereniya temperatury dvizhushchegosya ob"ekta* [Multi-channel device for measuring the temperature of a moving object]. Patent SU, no. 1626832, 2005.

12. Yakubovskii S.V., Nissel'son L.I., Kuleshov V.I. i dr. *Tsifrovye i analogovye integral'nye mikroskhemy: Spravochnik* [Digital and analog integrated circuits: Reference]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 536 p. (in Russ.).

13. Syakterev V.N., Syaktereva V.V., Akchurin I.S. [Researching the Possibility of Using PIC Microcontrollers in Systems of Internal Combustion Engine Piston Temperature Measurement]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2013, no. 2, pp. 105-108 (in Russ.).

14. Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V., Grishko A.K. [Metrology model of measuring channel in

multi-channel data-measurement system]. [2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 - Proceedings]. 2020, p. 9261527. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261527.

15. Kulikov V.A. [Temperature compensation in a discrete-analog intermediate converter]. *Izbrannye uchenye zapiski. V trekh tomakh*, 1998, vol. 2, pp.94-96 (in Russ.).

16. Akimov N.N., Vashchukov E.P., Prokhorenko V.A., Khodorenok Yu.P. *Rezistory, kondensatory, transformatory, drosseli, kommutatsionnye ustroystva REA: Spravochnik* [Resistors, capacitors, transformers, chokes, switching devices REA: Reference]. Minsk, Belarus' Publ., 1994, 591 p. (in Russ.).

17. *Katalog produktsii «GIRIKOND» «Elektronnye komponenty i pribory»* [GIRIKOND product catalog "Electronic components and devices"]. Saint-Petersburg, ROSEL Publ., 2021, 228 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Application of Passive Time-to-Pulse Converter in Temperature Measurement Systems of Moving Objects

V. A. Kulikov, Dr.Sc. in Engineering, Prof., Udmurt State Univrsity, Izhevsk, Russia

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Assoc. Prof., Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Syaktereva, PhD in Engineering, Assoc.Prof., Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A variant of the implementation of a time-to-pulse converter as part of a human temperature measurement system is considered, in which a first-order circuit forming an information time interval is formed by a resistance temperature device and a capacitor. Initialization and registration of the time for the transient phenomena are carried out by MIS transistor and an integral comparator. Assessment of the differential sensibility of the converter depending on the time constant of the forming circuit for medium-speed keys is provided.*

*The scheme of a multichannel converter is presented, with sequential and cyclic resistance of several thermal converters into the duration of the impulse response. At the same time, to decrypt the number of the measuring channel, the conversion cycles are separated by pauses.*

*The function of converting temperature into the duration of the time interval is derived for a nickel resistance temperature device based on an equivalent electrical circuit of a time-to-pulse converter. Analytic forms are obtained to assess the effect of inaccuracy of circuit elements and destabilizing factors on the temperature measurement error. The conditions for its reduction have been determined.*

*The converter connection is investigated in the Micro-Cap circuit simulation environment. The discrepancies between the experimental and calculated values of the conversion function did not exceed 0.2%. The temperature instability of the output information intervals of the time-to-pulse converter was no more than 0.1% in the operating temperature range 0 ...50°C and is due to the voltage temperature drift of the comparator bias voltage.*

*The use of a passive time-to-pulse converter is advisable in telemetry systems for measuring temperature or other physical quantities with primary resistance, capacitance or inductance converters forming a first-order circuit in the conversion path. The presented analytical expressions can be used to estimate the additional measurement error.*

**Ключевые слова:** temperature measurement, resistance temperature device, time-to-pulse converter.

Получено: 06.10.22

#### Образец цитирования

Куликов В. А., Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В. Применение пассивных время-импульсных преобразователей в системах измерения температуры подвижных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Том 20, № 4. С. 9–19. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-9-19.

#### For Citation

Kulikov V.A., Syakterev V.N., Syaktereva V.V. [Application of passive time-pulse converters in systems for measuring the temperature of moving objects]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 9-19 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-9-19.