

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

З.М. Селиванова, В.В. Третьяков

Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; selivanova@mail.jesby.tstu.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

**Ключевые слова и фразы:** дестабилизирующий фактор; измерительный канал; информационно-измерительная система; математическая модель; оптимизация.

**Аннотация:** Разработана математическая модель измерительного канала информационно-измерительных систем при воздействии дестабилизирующих факторов, применение которой позволит повысить точность и оперативность определяемых параметров информационно-измерительных систем в результате оптимизации параметров измерительного канала.

---

При проведении измерений в информационно-измерительных системах (ИИС) необходимо обеспечить точность определяемых параметров и оперативность обработки входных данных измерительного канала (ИК) для получения достоверной информации. Параметры точности и оперативности следует учитывать при математическом моделировании и оптимизации параметров ИК ИИС [1, 3, 5, 7]. Рассмотрим моделирование и оптимизацию параметров ИК ИИС, предназначенных для контроля температурного режима  $T$  радиоэлектронных средств, установленного условиями их эксплуатации. Измерительный канал включает первичные измерительные преобразователи температуры и усилитель постоянного тока.

Структура ИК представлена на рис. 1.

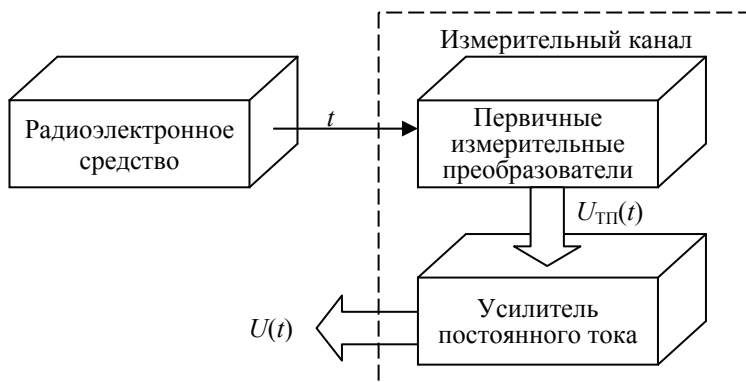


Рис. 1. Структурная схема измерительного канала

Первичные преобразователи представляют собой хромель-копелевые термопары (датчики температуры). Сигнал с датчиков температуры (ДТ)  $U_{\text{ТП}}(t)$  поступает на усилитель, который усиливает этот сигнал в соответствии с заданным коэффициентом усиления  $K_y$ . В рассматриваемом усилителе ИИС  $K_y = 100$ .

Математическую модель (ММ) ИК можно представить в следующем виде

$$U(t) = f(U_{\text{ТП}}(t)K_y), \quad (1)$$

где  $U_{\text{ТП}}(t)$  – входной сигнал с датчиков температуры (термопар);  $K_y$  – коэффициент усиления усилителя;  $U(t)$  – выходной сигнал с ИК;  $t$  – температура.

Поскольку ММ (1) не учитывает дестабилизирующие факторы (ДФ), воздействующие на ИИС, то необходимо представить более подробное математическое описание ИК ИИС, в котором учитывались бы основные ДФ (температура  $T_{\text{ОС}}$  и влажность воздуха  $W_{\text{ОС}}$  окружающей среды (ОС)), влияющие на функционирование радиоэлектронных средств. Данная модель представлена следующим образом [1, 2, 4, 6]:

$$U(t) = \left[ k_c + K_y \sum_{i=1}^n a_i \eta_i(t) \right] K_y U_{\text{ТП}}(t) + K_y \sum_{i=1}^n b_i \eta_i(t), \quad (2)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – коэффициенты чувствительности для рассматриваемого ИК;  $\eta_i(t)$  – влияющие величины (ВВ) на погрешность измерения ИК;  $n$  – количество ВВ;  $k_c$  – значение коэффициента преобразования ДТ в нормальных условиях.

Входной сигнал с датчиков температуры  $U_{\text{ТП}}(t)$  определяется по известному преобразованию температуры в напряжение термопарами [3]

$$U_{\text{ТП}}(t) = \sum_{i=0}^4 h_i t^i, \quad (3)$$

где  $h_i$  – матрица коэффициентов аппроксимирующей функции преобразования измеряемой температуры ДТ.

Подставив выражение (3) в (2), получим

$$U(t) = \left[ k_c + K_y \sum_{i=1}^n a_i \eta_i(t) \right] K_y \sum_{i=0}^4 h_i t^i + K_y \sum_{i=1}^n b_i \eta_i(t). \quad (4)$$

Значения влияющих величин ДФ в ММ безразмерны и задаются, как правило, произвольно на интервале от  $-1$  до  $1$ . Поэтому необходимо перейти от безразмерной величины ДФ к конкретным их значениям: температуры  $T_{\text{ОС}}$  и влажности воздуха  $W_{\text{ОС}}$ .

Влияние влажности ОС на выходной сигнал ИК описывается экспоненциальной зависимостью

$$\Delta U(W_{\text{ОС}}) = \alpha e^{k_w W_{\text{ОС}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta U(W_{\text{ОС}})$  – абсолютная погрешность, вносимая повышенной влажностью воздуха ОС;  $W_{\text{ОС}}$  – значение влажности ОС, %;  $k_w$  – коэффициент влажности,  $k_w = 0,1$ ;  $\alpha$  – коэффициент преобразования,  $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-4}$  [1–3].

Влияния температуры ОС на выходное значение сигнала ИК определяется выражением

$$\Delta U(T_{\text{ОС}}) = K_{\text{и}} (\beta (T_{\text{ОС}} - 20))^3, \quad (6)$$

где  $\Delta U(T_{\text{ОС}})$  – абсолютная погрешность, вносимая изменением температуры ОС;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент изгиба аппроксимирующей зависимости,  $K_{\text{и}} = 0,05$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент,  $\beta = 0,1$  [1–3].

С использованием выражений (5) и (6), модель (4) с учетом ДФ принимает вид

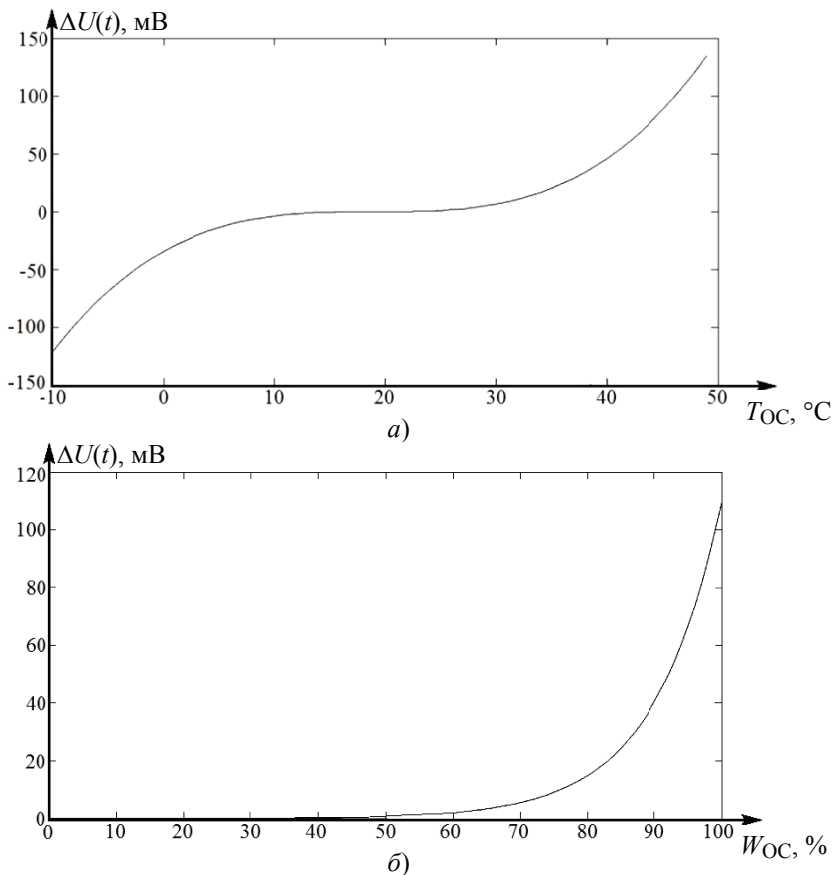
$$U(t) = \left[ K_c + K_y \sum_{i=1}^n a_i [\Delta U(T_{OC}) + \Delta U(W_{OC})] \right] K_y [U_{ТП}(t) + \Delta U(T_{OC}) + \Delta U(W_{OC})] + K_y \sum_{i=1}^n b_i [U_{ТП}(t) + \Delta U(T_{OC}) + \Delta U(W_{OC})] \quad (7)$$

или

$$U(t) = \left[ K_c + K_y \sum_{i=1}^n a_i \left[ K_n (\beta(T_{OC} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{OC}} \right] \right] K_y \times \times K_y \sum_{i=1}^n b_i \left[ U_{ТП}(t) + K_n (\beta(T_{OC} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{OC}} \right]. \quad (8)$$

При проведении исследований задаются граничные значения дестабилизирующих факторов  $T_{OC}$  и  $W_{OC}$ , а также значения данных параметров при нормальных условиях эксплуатации ИИС.

На рисунке 2 приведены графические зависимости  $\Delta U(t) = f(T_{OC})$  и  $\Delta U(t) = f(W_{OC})$ .



**Рис. 2. Зависимости абсолютной погрешности  $\Delta U(t)$  от влияния  $T_{OC}$  (а) и  $W_{OC}$  (б)**

Для проверки адекватности ММ при воздействии ДФ проведены экспериментальные исследования ИИС при различных значениях  $T_{OC}$  и  $W_{OC}$ . Полученные экспериментальные зависимости аппроксимированы для занесения в базу данных ИИС с целью коррекции выходных параметров ИК.

Как уже отмечалось выше, основными показателями качества при функционировании ИИС являются оперативность и точность определяемых параметров, поэтому предлагается для повышения адекватности модели ввести в модель ИК коэффициенты потерь точности  $K_T$  и оперативности  $K_O$  при воздействии ДФ [5].

Тогда математическая модель (8) примет вид

$$U(t) = \left[ K_c + K_T K_O K_y \sum_{i=1}^n a_i \left[ K_{и} (\beta(T_{OC} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{OC}} \right] \right] K_y \times \\ \times K_T K_O K_y \sum_{i=1}^n b_i \left[ U_{ТП}(t) + K_{и} (\beta(T_{OC} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{OC}} \right]. \quad (9)$$

Необходимо вычислить оптимальные значения  $K_T$  и  $K_O$ , которые могли бы учитывать влияние ДФ при измерении  $U(t)$ .

Задача оптимизации параметров ИК формируется следующим образом. Необходимо определить  $\delta U(t)$ , при которой потери точности и оперативности будут минимальны. Критерием оптимизации в данном случае является минимальная относительная погрешность  $\delta U(t)$  измерения выходного сигнала ИК, которая должна составлять не более 0,1 % для определения выходного параметра ИИС с допустимой погрешностью 3–5 %.

Для определения оптимального значения  $\delta U(t)$  введем критерий оптимальности, комплексно учитывающий потери точности и оперативности,

$$J(\delta U(t), ИО) = [V_1 K_T(\zeta, \delta U(t), ИО, ДФ) + V_2 K_O(\zeta, \delta U(t))] \rightarrow \min_{\delta U(t), \zeta}, \quad (10)$$

где  $V_1, V_2$  – весовые коэффициенты;  $\zeta$  – вид применяемого усилителя ИК; ИО – исследуемый объект.

Для проведения процедуры оптимизации параметров ИК необходимо задать граничные значения дестабилизирующих факторов, при которых ИИС будет функционировать с допустимой погрешностью:  $-10^\circ\text{C} < T_{OC} < +50^\circ\text{C}$ ,  $50\% < W_{OC} < 100\%$ .

При различных значениях дестабилизирующих факторов проведены экспериментальные исследования по определению параметра ИК  $U(t)$ , результаты которых сведены в табл. 1.

Для коррекции относительной погрешности измерения  $\delta U(t)$  в условиях влияния дестабилизирующих факторов необходимо определить соответствующие величины коэффициентов точности и быстродействия. Данные величины должны изменять свои значения при различных граничных условиях эксплуатации ИИС. Предполагается, что  $K_T$  и  $K_O$  принимают значения на интервале от 0 до 1.

Для контроля изменения выходного сигнала ИК  $U(t)$  при заданных граничных условиях проведены имитационные исследования с использованием пакета прикладных программ MatLab.

Таблица 1

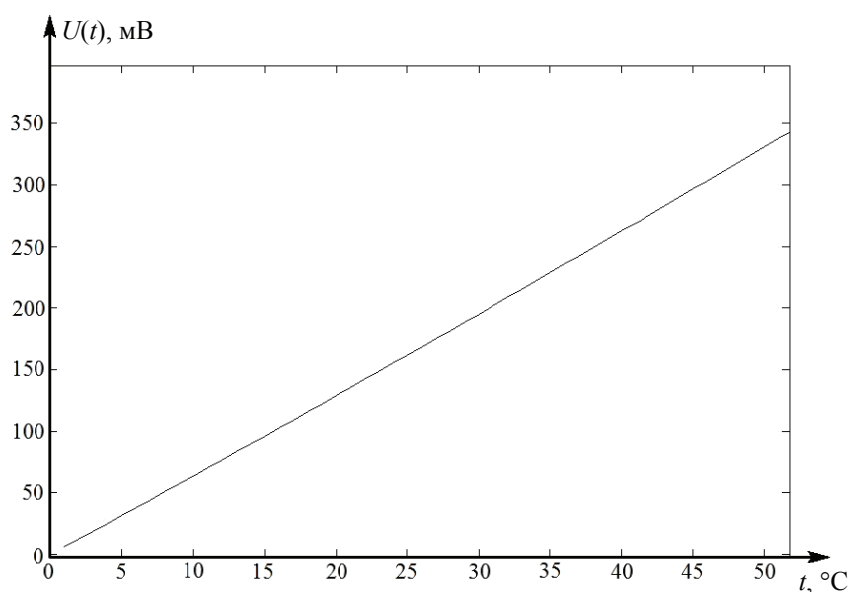
**Значения  $\delta U(t)$  при нормальных и граничных значениях ДФ**

$T_{OC}, ^\circ\text{C}$	$W_{OC}, \%$	$U(t), \text{мВ}$	$\delta U(t), \%$
-10	99	166,0	49,8
20	50	331,1	0,1
50	100	498,0	48,3

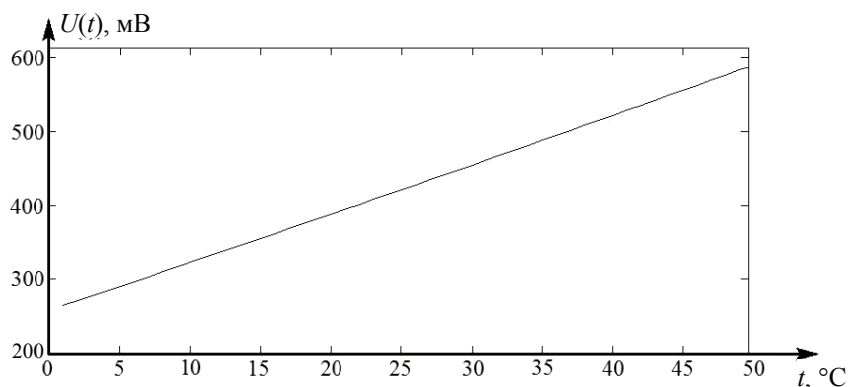
Чтобы выявить, каким образом ДФ влияют на выходной сигнал ИК, необходимо в первую очередь рассмотреть идеальный случай, то есть без учета ДФ. Для этого в программной среде MatLab реализована зависимость преобразования хромель-копелевыми термопарами температуры в значение ЭДС (рис. 3, а).

Реализована ММ (8) в среде MatLab с учетом граничных значений дестабилизирующих факторов ( $T_{OC} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{OC} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $W_{OC} = 100\%$ ). Результаты моделирования представлены на рис. 3, б. Как видно из графика, в выходном сигнале ИК  $U(t)$  при воздействии ДФ изменена амплитуда напряжения смещения сигнала  $U(t)$  на 270 мВ.

Для коррекции выходного сигнала  $U(t)$  при воздействии ДФ необходимо в ММ (9) ввести значения коэффициентов  $K_T$  и  $K_O$  на интервале от 0 до 1 с шагом 0,01 при имитации воздействия значений дестабилизирующих факторов, причем  $T_{OC}$  задается на интервале от  $-10$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с шагом изменения  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $W_{OC}$  от 50 до 100 % с шагом 5 %.



а)



б)

**Рис. 3. Зависимости выходного сигнала  $U(t)$  ИК от температуры без учета ДФ (а) и при граничных значениях (б)**

Результаты расчета значений выходного сигнала  $U(t)$  и относительных погрешностей при различных значениях ДФ сведены в табл. 2.

Построим график зависимости относительной погрешности измерения  $U(t)$  и критерия оптимальности  $J$  ( $K_T$  и  $K_O$ ) при весовых коэффициентах  $V_1 = V_2 = 1$ . Данный график представлен на рис. 4.

Коэффициент оперативности  $K_O$  характеризует быстродействие функционирования ИИС. При приближении значений ДФ к граничным оперативность резко уменьшается, что приводит к увеличению времени  $\tau$  определения ИИС результатов измерений  $T$ .

По результатам имитационных исследований получены значения времени  $\tau$  при граничных значениях ДФ и нормальных условиях. Данные результаты сведены в табл. 3.

Таблица 2

**Оптимальные значения  $K_T$  и  $K_O$  при нормальных и граничных значениях ДФ**

$T_{OC}, ^\circ C$	$W_{OC}, \%$	$U(t), мВ$	$\delta U(t), \%$	$K_T$	$K_O$
-10	99	330,60	0,080	0,01	0,01
20	50	330,95	0,050	0,97	0,99
50	100	331,03	0,085	0,02	0,03

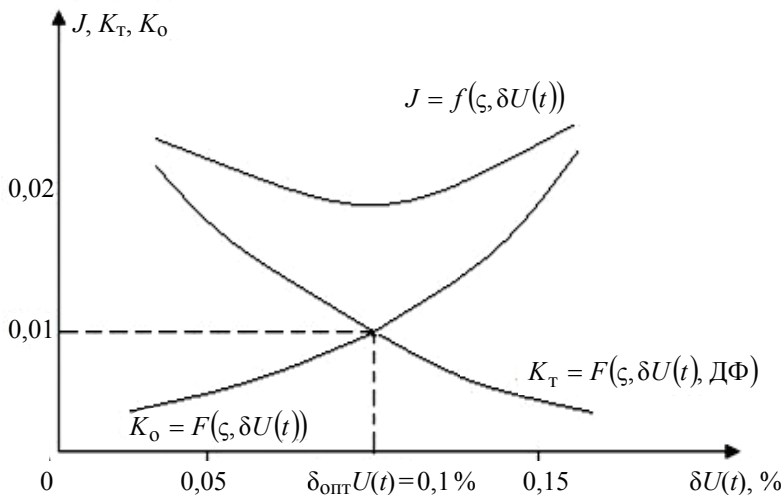


Рис. 4. Значения  $J, K_T$  и  $K_O$  при оптимальном значении  $\delta U(t)$

Таблица 3

**Значения  $\tau$  при нормальных и граничных значениях ДФ**

$T_{OC}, ^\circ C$	$W_{OC}, \%$	$\tau, с$
20	50	0,5
-10	99	2,0
50	100	1,0

Изменение критерия (10)  $J(\delta U(t), \text{ИО})$  при  $V_1 = V_2 = 1$  для зависимостей  $K_T = f(\zeta, \delta U(t), \text{ИО, ДФ})$  и  $K_o = f(\zeta, \delta U(t))$  показано на рис. 4, из которого следует, что оптимальная погрешность параметра ИК  $U(t)$ , при которой выходной параметр  $U(t)$  определяется с допустимой погрешностью 3–5 %, составляет  $\delta_{\text{опт}} U(t) = 0,1 \%$ .

Пример результатов имитационного моделирования при определении  $U(t)$  приведен на рис. 5. Аналогичные зависимости выходного сигнала  $U(t)$  получены для  $T_{\text{OC}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{OC}} = 100 \%$ ,  $K_T = 0,02$ ,  $K_o = 0,03$  и  $T_{\text{OC}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{OC}} = 50 \%$ ,  $K_T = 0,97$ ,  $K_o = 0,99$ .

Анализ результатов имитационного моделирования ИК ИИС при реализации модели ИК позволяет сделать вывод, что при нормальных условиях  $K_T$  и  $K_o$  стремятся к 0,99, а при граничных значениях дестабилизирующих факторов – к 0,01. Следовательно, в математическую модель (9) ИК рассматриваемой ИИС добавляются граничные условия ее реализации, и она принимает окончательный вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U(t) = \left[ K_c + K_T K_o K_y \sum_{i=1}^n a_i \left[ K_{\text{и}} (\beta(T_{\text{OC}} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{\text{OC}}} \right] \right] K_y \times \\ \times K_T K_o K_y \sum_{i=1}^n b_i \left[ U_{\text{ТП}}(t) + K_{\text{и}} (\beta(T_{\text{OC}} - 20))^3 + \alpha e^{k_w W_{\text{OC}}} \right]; \quad (11) \\ \text{при } T_{\text{OC}} \rightarrow 50 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } W_{\text{OC}} \rightarrow 100 \% \quad K_T \rightarrow 0,02 \text{ и } K_o \rightarrow 0,03; \\ \text{при } T_{\text{OC}} \rightarrow -10 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } W_{\text{OC}} \rightarrow 99 \% \quad K_T \rightarrow 0,01 \text{ и } K_o \rightarrow 0,01; \\ \text{при } T_{\text{OC}} \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } W_{\text{OC}} \rightarrow 50 \% \quad K_T \rightarrow 0,97 \text{ и } K_o \rightarrow 0,99. \end{array} \right.$$

Таким образом, разработана математическая модель (11) и оптимизированы параметры измерительного канала информационно-измерительной системы, в которой определены значения коэффициентов потерь точности и оперативности при различных условиях эксплуатации рассматриваемой ИИС, что позволяет определять выходной параметр измерительного канала  $U(t)$  с оптимальной погрешностью 0,1 % и определяемый параметр ИИС –  $T$  с допустимой погрешностью 3–5 % и оперативностью при контроле температурных режимов радиоэлектронных средств.

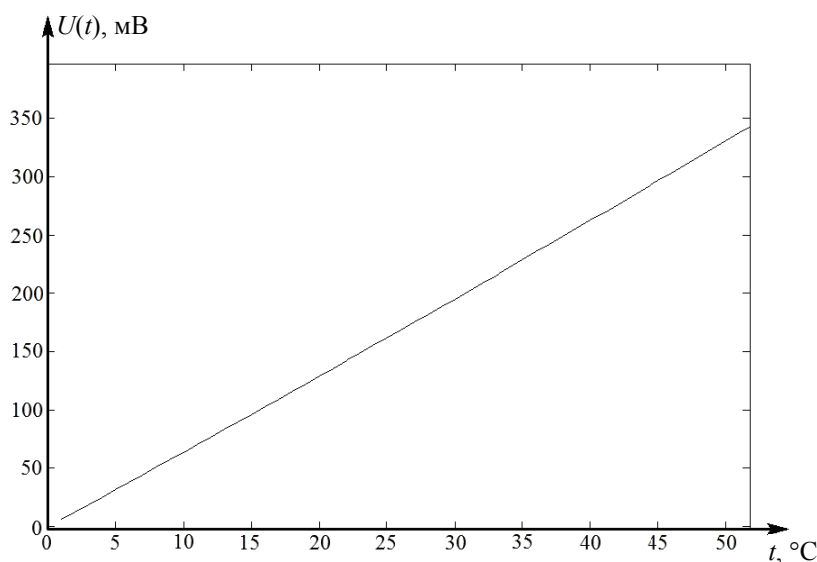


Рис. 5. Выходной сигнал  $U(t)$  при  $T_{\text{OC}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{OC}} = 99 \%$ ,  $K_T = 0,01$  и  $K_o = 0,01$

Адекватность математической модели ИК подтверждена результатами проведенных экспериментальных и имитационных исследований ИИС с использованием программной среды MatLab.

Разработанную математическую модель измерительного канала рекомендуется использовать при создании структур ИК информационно-измерительных систем, что позволит обеспечить требуемую точность и оперативность при определении параметров ИК при функционировании ИИС.

#### *Список литературы*

1. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов / М.П. Цапенко. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 358 с.
2. Уэбстер, Дж. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC : пер. с англ. / Дж. Уэбстер. – М. : Мир, 1992. – 592 с.
3. Экспериментальная и техническая метрология : учеб. пособие для вузов / Е.Н. Граменицкий [и др.]. – М. : Научный мир, 2000. – 416 с.
4. Муромцев, Ю.Л. Математическое обеспечение интеллектуальных контроллеров систем энергосберегающего управления / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин // Системы упр. и информ. технологии. – 2008. – № 3.2 (33). – С. 287–290.
5. Селиванова, З.М. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств твердых материалов / З.М. Селиванова // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 4. – С. 153–154.
6. Селиванова, З.М. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З.М. Селиванова, А.А. Самохвалов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273–283.
7. Стасенко, К.С. Решение задачи обеспечения заданной точности и качества при определении теплопроводности теплоизоляционных материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой / К.С. Стасенко, З.М. Селиванова // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 435–443.

---

## **Modelling and Optimization of Parameters of the Measuring Channel in Data Measuring Systems**

**Z.M. Selivanova, V.V. Tretyakov**

*Department “Designing of Electronic and Microprocessor Systems”, TSTU;  
selivanova@mail.jesby.tstu.ru*

**Key words and phrases:** destabilizing factor; data measuring system; mathematical model; measuring channel; optimization.

**Abstract:** The mathematical model of the measuring channel of data measuring systems under the influence of destabilizing factors is developed, its application in the design of the measuring channels will increase the accuracy and timeliness of the parameters of data measuring systems as a result of optimization of the measuring channel parameters.



## **Modellierung und Optimisation der Parameter des Meßkanals der Informationsmeßsysteme**

**Zusammenfassung:** Es ist das mathematische Modell des Meßkanals der Informationsmeßsysteme bei der Einwirkung der entstabilisierenden Faktoren erarbeitet. Die Anwendung dieses Modells bei der Erarbeitung der Meßkanäle der Systeme erlaubt, die Genauigkeit und die Schelligkeit der bestimmenden Parameter der Informationsmeßsysteme im Resultat der Optimisation der Parameter des Meßkanals zu erhöhen.

---

## **Modélage et optimisation des paramètres de la chaîne de mesure des systèmes d'information et de mesure**

**Résumé:** Est élaboré le modèle mathématique de la chaîne de mesure des systèmes d'information et de mesure lors de l'action des facteurs déstabilisants dont l'application permettrait d'augmenter la précision et la rapidité des paramètres définis des systèmes d'information et de mesure à cause de l'optimisation des paramètres de la chaîne de mesure.

---

**Авторы:** *Селиванова Зоя Михайловна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Третьяков Владимир Владиславович* – магистрант, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---