

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 658.562.64

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-67-77

Математическая модель долговременного температурного воздействия для диагностики электрических контрольно-измерительных приборов: исследование и моделирование

А. П. Бобрышов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Оценка долговременной стабильности работы электрических контрольно-измерительных приборов представляет собой сложную задачу, связанную с влиянием внешних факторов, главным из которых является температура окружающей среды. Продолжительное влияние температуры приводит к деградиционным процессам электрических, магнитных и механических элементов конструкции измерительных устройств, что выражается в падении точности приборов. Главной задачей данного исследования является построение математической модели, описывающей долговременное температурное воздействие на техническое качество контрольно-измерительных приборов. Отличием от ранее предложенной автором модели кратковременного воздействия является описание необратимых температурных процессов. В разработанной модели учтены изменения сопротивления и температурного коэффициента сопротивления, магнитной индукции и температурного коэффициента магнитной индукции, а также упругости и момента возвратной пружины аналогово-стрелочных контрольно-измерительных приборов. Для описания динамики деградиционных процессов за основу взято уравнение Аррениуса, позволившее сформировать зависимости для оценки изменения точностных параметров во времени. По результатам моделирования получены кривые изменения точности приборов аналогово-стрелочных и цифровой систем. Результаты показывают, что механические и магнитные узлы оказываются более чувствительными к температурным изменениям по сравнению с электронной частью цифровых измерительных устройств. Предложенная модель позволяет прогнозировать снижение качества функционирования электрических контрольно-измерительных приборов в реальных условиях эксплуатации, учитывать климатические факторы при выборе оборудования и корректировать межповерочные интервалы с учетом условий эксплуатации. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции разработанных инструментов в систему оценки качества контрольно-измерительных приборов, что повышает надежность эксплуатации приборов и обеспечивает более объективную количественную оценку их состояния.

Ключевые слова: долговременное температурное воздействие, электрические контрольно-измерительные приборы, математическая модель, точность измерений, деградация элементов, уравнение Аррениуса.

Введение
Параметр качества функционирования электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) определяется степенью корректности измерения электрической величины прибором в условиях установленных паспортных параметров точности. Отклонение условий эксплуатации от нормированных приводит к искажению метрологических параметров, что отражается на корректности работы ИУ и их долговременной надежности [1]. При этом качество функционирования определяется совокупностью электрических, магнитных и механических факторов, формирующих итоговую характеристику точности [2].

Одним из основных факторов, влияющих на электрическую часть КИП, является температурная зависимость сопротивления. В литературе отмечается, что изменение сопротивления напрямую связано с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), зависящим от материала и конструкции элемента [3]. Данный параметр рассматривается как ключевая величина, определяющая изменение сопротивления под воздействием температуры, как при

кратковременных, так и долговременных режимах эксплуатации [4]. Классические исследования в области метрологии подтверждают, что рост температуры приводит к увеличению погрешностей измерений в процессе эксплуатации измерительных устройств (ИУ).

Для магнитной системы КИП температура является критическим фактором, вызывающим снижение параметра магнитной индукции. Исследования ферритов подтверждают изменение характеристик при их длительном нагреве, а также выделяют роль термостабильности постоянных магнитов как ключевого параметра надежности измерительных устройств [5, 6]. Дополнительно существующие работы в области исследования влияния температуры показывают аналогичные тенденции для современных магнитных материалов и подтверждают наличие зависимости между температурой и изменением магнитных свойств [7].

Анализ конструктивных особенностей стрелочных измерительных приборов подтверждает, что возвратные пружины являются одной из наиболее уязвимых частей конструкции [8]. Эксперименты по термомеханической обработке также фиксируют

снижение упругости и изменение структуры материалов при температурных воздействиях, а последние исследования демонстрируют количественные зависимости коэффициента упругости пружин при варьировании температуры [9, 10]. При этом повышение стабильности приборов связано с применением более надежной элементной базы, в частности высокостабильных тонкопленочных резисторов [11].

Теоретическое описание процессов деградации часто формируется через уравнение Аррениуса, позволяющее описывать скорость физических и химических процессов в зависимости от величины и длительности влияния температуры [12]. Длительное температурное воздействие вызывает необратимые изменения в структуре элементов, особенно в тонкопленочных и керамических резисторах, за счет диффузии атомов. Данный процесс усугубляется окислением проводящих элементов, а при комбинированном воздействии с влагой происходит ускоренная деградация целостности поверхности элемента и морфологии материалов. В металлосодержащих структурах наблюдается рост кристаллитов, электромиграция и интердиффузия, что критично влияет на проводящие пути. Для запуска данных процессов необходимо преодоление энергетического барьера активации, что достигается при определенной температуре или продолжительном ее воздействии. Согласно уравнению Аррениуса скорость деградации свойств элемента описывается зависимостью от температуры, что соответствует как физико-химическому смыслу реакций между атомами при сообщении им достаточной энергии. Уравнение Аррениуса служит фундаментальной основой для моделирования деградации при длительном воздействии температуры, что подтверждается уравнением Блэка, являющимся эмпирической моделью времени жизни межсоединений, построенной на базе уравнения Аррениуса с учетом электромиграции.

Дополнительно важно отметить, что данное уравнение успешно применяется в моделировании долговременной деградации механических и электрических узлов, в том числе с учетом изменения модуля Юнга [13].

Отдельно стоит выделить процессы, протекающие в электронных схемах при любых температурных параметрах окружающей среды. Ярким примером такого эффекта является тепловой электрический шум Джонсона – Найквиста, характеризующийся как случайное тепловое движение носителей заряда в проводнике, резистивных элементах и электронных устройствах. Важно отметить, что данный шум в большей степени зависит от таких параметров, как температура, при этом в значении нулевой температуры шум не проявляется. Именно данные параметры являются ключевыми в оценке уровня воздействия шума на работу электронной аппаратуры. Физически данный процесс возникает в электронной аппаратуре всегда, независимо от внешних источников тока или напряжения, и является фундаментальным свойством, в большей степени проявляющимся в высокоомных проводниках и элементах усиления или переключения

элементов электронной схемы [14]. Важно отметить, что данный эффект возможно фильтровать при помощи программных обеспечений, сужения полосы частот, использования узкополосных усилителей или применять адаптивные фильтры. При описании погрешностей измерений эффект теплового шума могут присваивать инструментальной, случайной, грубой или внешней погрешностям для упрощения. Стоит понимать, что долговременное воздействие температуры будет также влиять на показатель теплового шума, увеличивая его эффект. Это связано с ростом сопротивления при термическом воздействии, поэтому важно учитывать его влияние на КИП.

С позиции общей термодинамики описание состояния материалов в условиях внешних воздействий также проводится через уравнение состояния газа и модели идеального газа, которые позволяют учитывать влияние давления и температуры на компоненты приборов [15]. Данные подходы формируют основу для разработки многофакторных моделей оценки качества работы КИП.

Современные исследования в области интеллектуальных измерительных систем показывают, что долговременные климатические воздействия влияют не только на классические КИП, но и на умные счетчики электроэнергии. Установлено, что такие факторы, как температура и электромагнитные воздействия, вызывают рост метрологических ошибок и снижение согласованности результатов измерений [16]. Проблематика надежности электроники в условиях высоких температур получила развитие и в зарубежных работах, где рассматриваются вопросы деградации компонентов и потери стабильности измерительных узлов [17]. Влияние температуры на магнитные свойства подтверждается также современными экспериментами, проводимыми на новых композитных материалах и структурах [18, 19].

В последние годы внимание уделяется вопросам разработки приборов для экстремальных условий эксплуатации. Рассматриваются физические и технологические аспекты функционирования электроники в условиях высоких температур и агрессивных сред, а также анализируется влияние температуры на эффекты проводимости и магнитоэлектрические явления в композитных структурах [20].

Таким образом, анализ литературы показывает, что температура имеет комплексное воздействие на электрические, магнитные и механические узлы КИП, вызывая как обратимые, так и необратимые изменения. Несмотря на наличие значительного количества исследований, в настоящее время отсутствует универсальная математическая модель, учитывающая долговременное термическое воздействие на прибор в целом. Ранее автором была предложена математическая модель кратковременного температурного влияния на метрологические характеристики КИП. Настоящая работа является ее развитием и направлена на описание долговременного воздействия, приводящего к необратимым изменениям параметров приборов и снижению их технического качества.

Цель исследования – изучение долговременного влияния температуры на техническое качество электрических контрольно-измерительных приборов и разработка математической модели, описывающей деградацию электрических, магнитных и механических узлов измерительных устройств в зависимости от условий времени эксплуатации приборов.

Физические основы долговременного температурного воздействия на КИП

Долговременное воздействие температуры на электрические КИП представляет собой совокупность физических и физико-химических процессов, которые происходят в их конструктивных узлах. Данные процессы вызывают изменение параметров элементов, входящих в состав прибора, и приводят к снижению точности и надежности измерений.

В электрическую часть КИП входят такие элементы, как резисторы, полупроводниковые компоненты, операционные усилители, диоды, транзисторы, компараторы, конденсаторы и др. Одним из основных параметров, влияющих на работу электрической цепи, является сопротивление. В простейшем виде его температурная зависимость описывается линейной формулой

$$R = R_0 (1 + \lambda (T - T_0)),$$

где R_0 – сопротивление при начальной температуре T_0 ; λ – ТКС; T – текущая температура.

ТКС является материалозависимой величиной, различающейся для металлов, полупроводников и композиционных материалов. У металлов ТКС положительный, что означает увеличение сопротивления с ростом температуры, у полупроводников – отрицательный.

Кроме линейного эффекта в сложных конструкциях приборов могут быть нелинейные температурные проявления, которые учитывают квадратичные поправки. Такие зависимости записываются в виде

$$\Delta Q = \beta (T - T_0)^2,$$

где ΔQ – итоговая величина после воздействия нелинейного эффекта; β – температурный коэффициент нелинейности (ТКН), учитывающий квадратичный эффект от воздействия температуры; T – температура; T_0 – изначальная температура.

В АСТ КИП основным элементом магнитной системы является постоянный магнит. Магнитная индукция B уменьшается с ростом температуры из-за теплового хаотического движения атомов, нарушающего упорядоченность магнитных моментов. Для кратковременных условий температурная зависимость может быть описана линейно как

$$B = B_0 (1 - \chi (T - T_0)),$$

где B_0 – магнитная индукция при температуре T_0 ; χ – ТКМИ.

При длительном воздействии, помимо снижения магнитной индукции, возможны изменения структу-

ры материала магнита, но в рамках данного раздела учитываются только известные из литературы линейные зависимости.

Также в приборах системы АСТ важную роль играет возвратная пружина, обеспечивающая противодействующий момент, уравнивающий вращение стрелки. При нагреве упругость пружины уменьшается, что приводит к снижению момента:

$$M(T) = M_0 \frac{E(T)}{E_0},$$

где M_0 и E_0 – соответственно, момент и упругость в начальном состоянии; $E(T)$ – упругость после воздействия температуры.

Дополнительно стоит отметить температурное изменение упругости материалов, которое выражается через коэффициент теплового расширения ρ :

$$E = E_0 (1 - \rho (T - T_0)).$$

Дополнительно важно отметить эффект теплового шума Джонсона – Найквиста, фильтрация которого сложна, учитывая характер проявления, связанный с изменением температуры, и, как было описано выше, учитывающийся в погрешности другого рода измерений. При этом в процессе долговременного влияния температуры он способен изменять характеристики и функционал электронной компонентной базы навсегда. Учет эффекта теплового шума Джонсона – Найквиста принимать во внимание важно и обязательно как конструктивную особенность полупроводников, зависимость от сопротивления и температуры. Тепловой шум описывается выражениями

$$U_{\text{т.ш}} = \sqrt{4kTRF};$$

$$I_{\text{т.ш}} = \sqrt{4TiF},$$

где $U_{\text{т.ш}}$ и $I_{\text{т.ш}}$ – среднеквадратичные значения напряжения и тока теплового шума соответственно; k – постоянная Больцмана; T – температура, К; R – сопротивление; F – полоса частот.

Математическая модель долговременного влияния температуры

На основе рассмотренных зависимостей, а также учитывая предыдущую модель кратковременного воздействия температуры, разработанную автором, можно перейти к разработке математической модели долговременного температурного воздействия на техническое качество электрических КИП. Для формирования данной модели важно понимать физику необратимых процессов деградации, происходящих в электрических, магнитных и механических узлах. Данное явление относится к физико-химическому воздействию процессам деградации, что отлично описывается через уравнение Аррениуса. Базовое уравнение деградации имеет следующий вид:

$$\theta(T) = Ae^{-\frac{E_a}{kT}},$$

где $\theta(T)$ – скорость изменения величины; A – предэкспоненциальный коэффициент, характеризующий частоту элементарных процессов; E_a – энергия активации процесса деградации; k – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Сформируем формулу, описывающую долговременное изменение сопротивления резистивных элементов прибора. Введем зависимость

$$R(t) = R_{beg} e^{\theta(T)t},$$

где $R(t)$ – сопротивление в момент времени t ; R_{beg} – начальное сопротивление.

Учитывая, что ТКС является производной сопротивления по температуре, долговременное изменение коэффициента выражается как

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{R_{beg} e^{\theta(T)t}} \frac{dR}{dT}; \\ \frac{dR}{dT} &= R_{beg} e^{\theta(T)t} \frac{d\theta}{dT} t; \\ \lambda &= \frac{1}{R_{beg} e^{\theta(T)t}} R_{beg} e^{\theta(T)t} \frac{d\theta}{dT} t; \\ \lambda &= \frac{d\theta}{dT} t; \\ \frac{d\theta}{dT} &= A e^{\frac{-E_a}{kT}} \frac{E_a}{kT^2}; \\ \lambda &= A e^{\frac{-E_a}{kT}} \frac{E_a}{kT^2} t. \end{aligned}$$

Таким образом, итоговая зависимость описывает изменение ТКС с учетом долговременного влияния температуры на структуру элемента сопротивления.

Для постоянных магнитов аналогово-стрелочных КИП долговременное воздействие температуры приводит к экспоненциальному снижению магнитной индукции:

$$B(t) = B_{beg} e^{\theta(T)\frac{-t}{\tau}},$$

где B_{beg} – измененная магнитная индукция; t – время воздействия температуры; τ – время размагничивания материала, в большей степени являющееся коэффициентом деградации для магнитной индукции.

Отрицательное значение дроби характеризует снижение магнитной индукции от воздействия температуры.

Изменение ТКМИ также является производной от магнитной индукции, поэтому

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{1}{B_{beg} e^{\theta(T)\frac{-t}{\tau}}} \frac{dB}{dT}; \\ \frac{dB}{dT} &= B_{beg} e^{\theta(T)\frac{-t}{\tau}} \frac{d\theta}{dT} t; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{1}{B_{beg} e^{\theta(T)\frac{-t}{\tau}}} B_{beg} e^{\theta(T)\frac{-t}{\tau}} \frac{d\theta}{dT} t; \\ \chi &= A e^{\frac{-E_a}{kT}} \frac{E_a}{kT^2} t. \end{aligned}$$

Получаем зависимость ТКМИ от продолжительного влияния температуры на магнит и его свойства.

Механическая составляющая в большей степени свойственна для АСТ КИП, важным элементом в которой является возвратная пружина, теряющая упругость в процессе длительного нагрева. При этом жесткость снижается, как и момент пружины, что подтверждается многочисленными исследованиями в данной области. Воспользуемся уравнением Аррениуса для формирования зависимости упругости и момента, развиваемого пружиной:

$$\begin{aligned} E(t) &= E_{beg} e^{-\theta(T)\frac{t}{\iota}}; \\ M(t) &= M_{beg} \frac{E_{beg} e^{-\theta(T)\frac{t}{\iota}}}{E_{beg}}; \\ M(t) &= M_{beg} e^{-\theta(T)\frac{t}{\iota}}, \end{aligned}$$

где E_{beg} – изначальная упругость пружины; $E(t)$ – упругость пружины после воздействия температуры; M_{beg} – изначальный момент с учетом базовой упругости материала пружины, не подверженного термическому воздействию; $M(t)$ – момент после определенного времени воздействия температуры на упругость; ι – характерное время релаксации с учетом влияния температуры, зависящее от вязкости материала и модуля его упругости [21].

Учитывая сформированные зависимости для описания продолжительного воздействия температуры на элементы и коэффициенты, отражающие техническое качество электрических КИП, учитывая специфику работы приборов, можно составить итоговую модель для каждого типа ИУ.

Для АСТ приборов долговременная составляющая погрешности $\Delta_{long}^{ast}(T, t)$ учитывает все вышеуказанные параметры и включает в себя изменение сопротивления, ТКС магнитной индукции, ТКМИ и момента пружины:

$$\Delta_{long}^{ast}(T, t) = f[R(t), \lambda(t), B(t), \chi(t), M(t)].$$

Для цифровых приборов долговременное изменение точности определяется изменением сопротивления и ТКС, а также теплового шума Джонсона – Найквиста:

$$\Delta_{long}^{dig}(T, t) = f[R(t), \lambda(t), I, U_{T,ш}].$$

Сформированная математическая модель позволяет осуществить расчет изменения технического

качества электрических КИП под воздействием долговременной температуры. Модель учитывает особенности конструктивных и метрологических параметров приборов АСТ и цифровых систем.

Результаты моделирования температурных зависимостей

Воспользуемся сформированными математическими зависимостями и проведем моделирование продолжительного действия температуры на отдельные величины и коэффициенты, влияющие на

точность и погрешность электрических КИП. Для оценки динамики сопротивления по сформированным зависимостям зададимся следующими величинами: внешняя температура $T = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$; сопротивление цепи КИП $R = 0,63\text{ МОм}$; ТКС $\lambda = 0,000021\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; предэкспоненциальный коэффициент $A = 10^{-4}$; энергия активации процесса деградации $E_a = 0,136\text{ эВ}$; постоянная Больцмана $k = 8,617 \cdot 10^{-5}\text{ эВ/К}$; время воздействия температуры $t = 8760\text{ ч}$ (см. рис. 1).

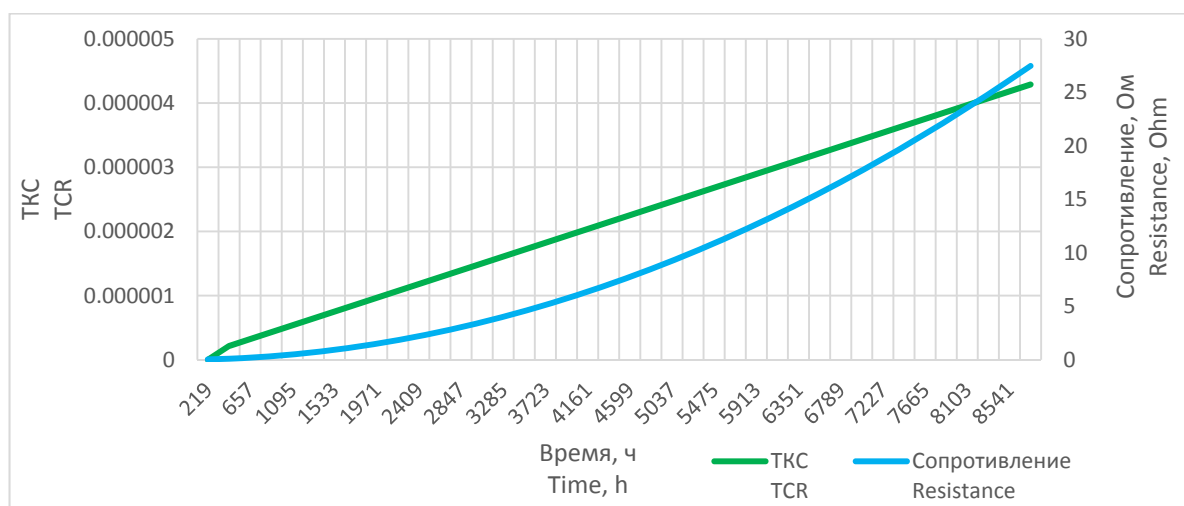


Рис. 1. Динамика сопротивления и ТКС при продолжительном влиянии температуры для резистора 0,63 МОм

Fig. 1. Dynamics of resistance and TCR under prolonged temperature influence for a 0,63 Mohm

С учетом моделирования в течение года при непрерывном термическом воздействии (8760 ч) сопротивление резистора изменилось примерно на 0,00436 % в пересчете на процентный эквивалент от изначальной величины. Вместе с изменением резистивных свойств элемента меняется и его ТКС, при этом характер изменения данного параметра остается линейным, несмотря на то, что зависимость, описывающая сопротивление, имеет экспоненциальную форму. Следует отметить, что при использовании данной зависимости для расчета ТКС, а также при оценке кратковременного влияния температуры на

сопротивление экспоненциальная форма изменения именно сопротивления сохраняется.

При проведении моделирования динамики магнитной индукции и ТКМИ по выведенным зависимостям долговременного эффекта за основу необходимо взять следующие данные: внешняя температура $T = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$; магнитная индукция $B = 0,02\text{ Тл}$; ТКМИ $\chi = 0,002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; предэкспоненциальный коэффициент $A = 0,0278$; энергия активации процесса деградации $E_a = 0,45\text{ эВ}$; постоянная Больцмана $k = 8,617 \cdot 10^{-5}\text{ эВ/К}$; время воздействия температуры $t = 8760\text{ ч}$ (см. рис. 2).

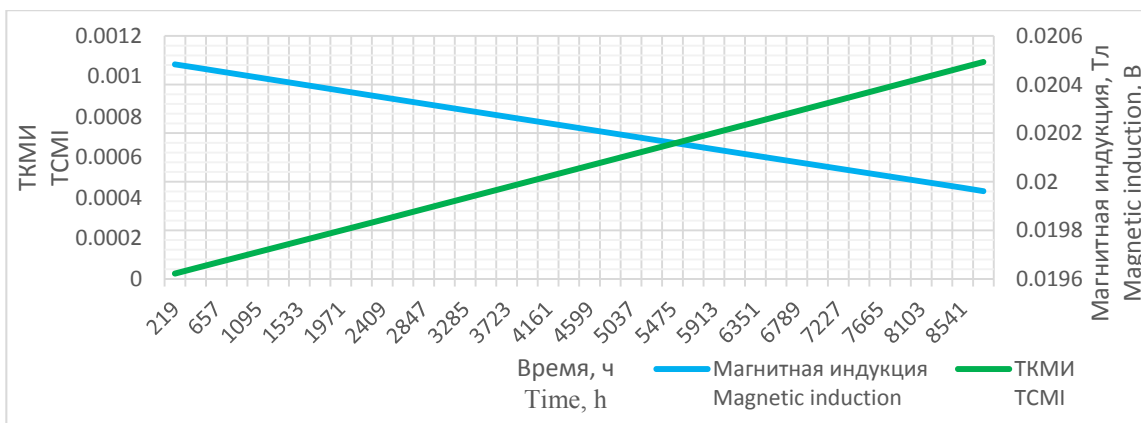


Рис. 2. Динамика магнитной индукции и ТКМИ при продолжительном влиянии температуры на постоянный магнит 0,02 Т

Fig. 2. Dynamics of magnetic induction and TKMI under prolonged temperature influence on a permanent magnet 0,02 T

Анализ изменения магнитной индукции под воздействием температуры в течение года (8760 ч) согласно сформированной математической модели демонстрирует ее снижение на 2,634 %, что полностью согласуется с результатами ранее проведенных исследований в данной области. При длительном воздействии температура вызывает экспоненциальное снижение магнитной индукции. Изменение характеристик ТКМИ схоже по своей природе к ТКС, что объясняет его линейную динамику во времени.

Для оценки динамики момента противодействия пружины зададимся начальными значениями для проведения оценки: внешняя температура $T = +50$ °С; удельный момент $M_{уд} = 0,0168$ Н·мм; предэкспоненциальный коэффициент $A = 10^{-7}$; энергия активации процесса деградации $E_a = 0,8$ эВ; постоянная Больцмана $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; время воздействия температуры $t = 8760$ ч (см. рис. 3).

Анализ результатов моделирования демонстрирует закономерное снижение удельного момента развиваемого пружиной по причине динамики жесткости под воздействием температуры. Это логично, поскольку момент и жесткость связаны между собой через произведение, а используемые в расчетах значения предэкспоненциального коэффициента и энергии активации процесса деградации определены с учетом свойств пружины. За условное время моделирования в один год воздействия температуры $+50$ °С момент уменьшается на 2,81 %, что эквивалентно коэффициенту 0,9719 от номинального значения. Полученный результат согласуется с литературными данными по динамике упругости, что подтверждает корректность предложенных зависимостей. Учитывая полученные результаты долговременного эффекта, получим общую форму динамики точности для приборов АСТ системы и цифровых ИУ (см. рис. 4).

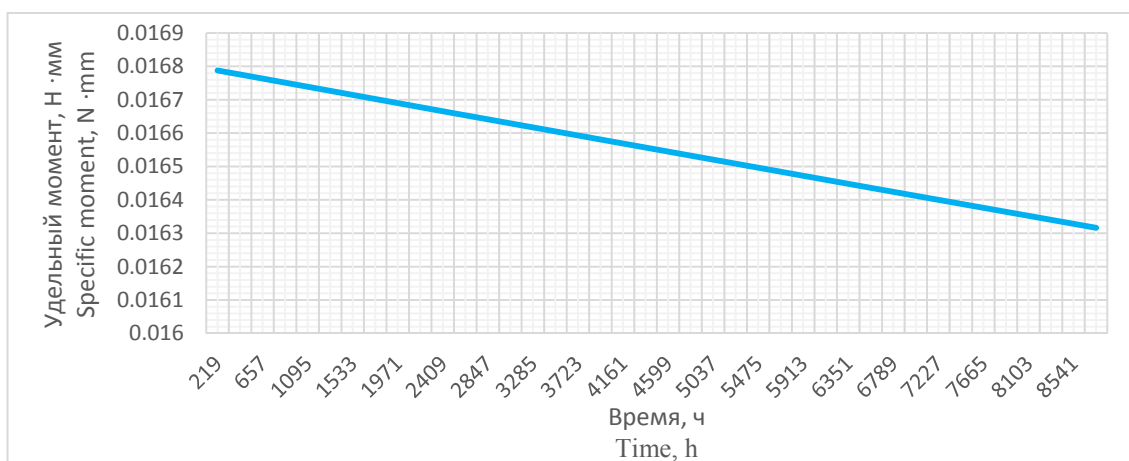


Рис. 3. Динамика удельного момента при продолжительном влиянии температуры на пружину АСТ КИП

Fig. 3. Dynamics of specific torque under long-term temperature exposure for an API CMI spring

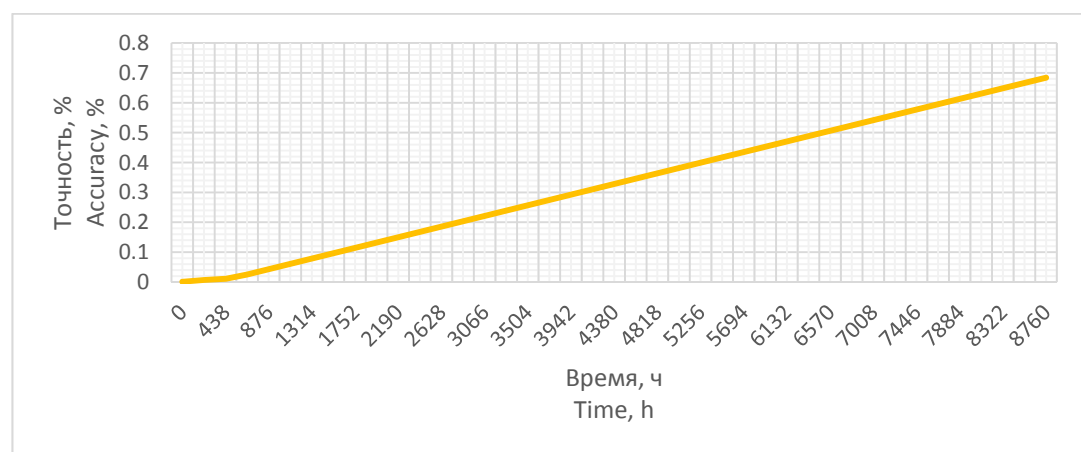


Рис. 4. Динамика точности КИП АСТ системы при продолжительном воздействии температуры на прибор

Fig. 4. Accuracy dynamics of CMI API under long-term temperature exposure

График для цифровых КИП в своей форме имеет сопротивление, которое также присутствует в уравнении теплового шума. Также изменяется параметр T КС. Общая динамика для ИУ цифровой системы будет выглядеть, как показано на рисунке 5.

Следует отметить, что сопротивление возрастает при положительных температурах и уменьшается при отрицательных. В то же время магнитная индукция и момент, развиваемый за счет жесткости пружины, снижаются при положительном теп-

ловом воздействии и увеличиваются при отрицательном. Совокупное влияние данных явлений на элементы прибора проявляется в линейном изменении точности, причем при повышении температуры эффект выражен сильнее, чем при ее понижении. Согласно результатам моделирования для АСТ КИП при температуре +50 °С и длительности воздействия 1 год (8760 ч) точность изменяется от 0 до 0,6837 %. Для цифрового прибора за тот же период динамика точности составляет от 0 до 0,2552 %.

Учитывая особенность сформированной модели длительного воздействия, а также эффект кратковременного влияния, сформируем комбинированные кривые температурного воздействия на работу электрических КИП АСТ и цифровой системы с применением ранее сформированной автором модели кратковременного воздействия температуры и описанной в данной статье долговременный эффект влияния температуры (см. рис. 6). В качестве исходных условий принята температура воздействия +50 °С и длительность работы $t = 8760$ ч (1 год).

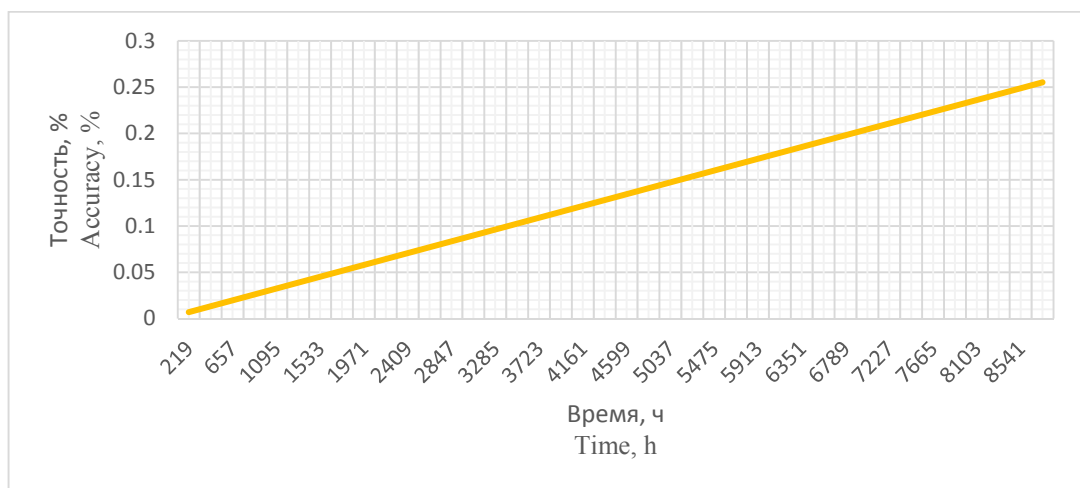


Рис. 5. Динамика точности КИП цифровой системы при продолжительном воздействии температуры на прибор

Fig. 5. Accuracy dynamics of digital CMI under long-term temperature exposure

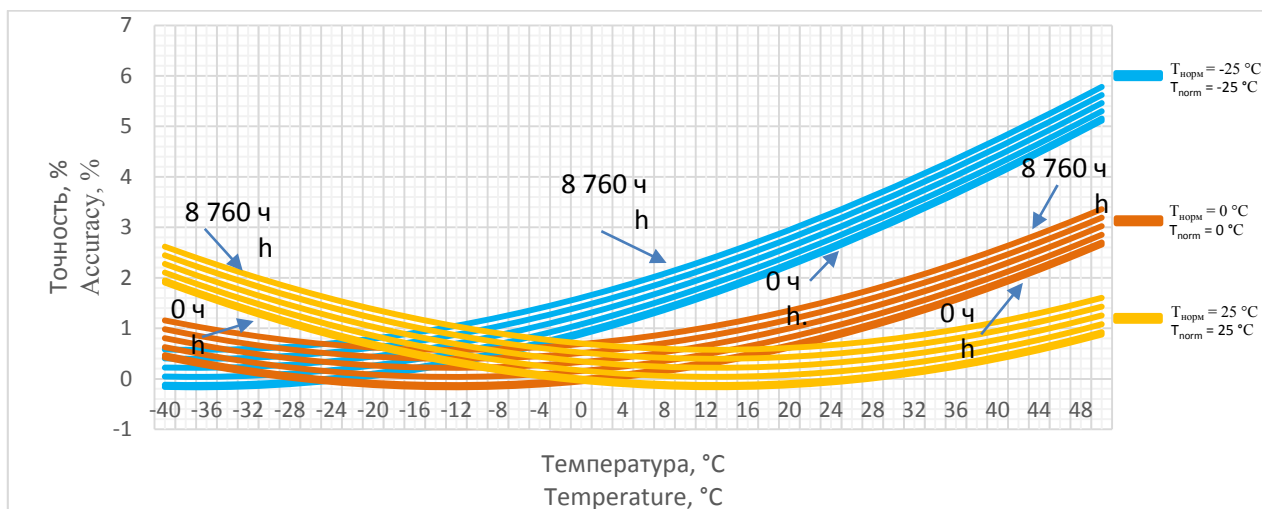


Рис. 6. График влияния температуры на техническое качество электрических КИП АСТ системы

Fig. 6. Temperature effect on technical performance of electrical API CMI

Результаты моделирования температурного воздействия на электрические КИП (см. рис. 7) демонстрируют значительное изменение технического качества, выражаемого через точность. Сравнительный анализ показывает:

- АСТ-приборы намного чувствительнее к долговременным изменениям температуры, что связано с наличием магнитной системы и механических элементов;

- цифровые приборы обладают большей термостабильностью, поскольку их погрешность определяется в основном изменением параметров электронных компонентов, которые в значительной степени более устойчивы к изменению температуры.

Особенно заметно влияние величины нормальной температурной точки эксплуатации, продолжительное влияние в которой также не защищает от динамики точности, что говорит о естественных деграда-

ционных процессах, связанных с температурой. Для цифровых КИП данный процесс настолько медленный, что можно отметить практически нулевое изменение точности в точке нормальной эксплуатации. При этом смещение точки даже на 10...15 °С в усло-

виях длительного воздействия приводит к заметному росту погрешности. Таким образом, поддержание условий, максимально близких к $T_{\text{норм}}$, является одним из ключевых факторов сохранения точности.

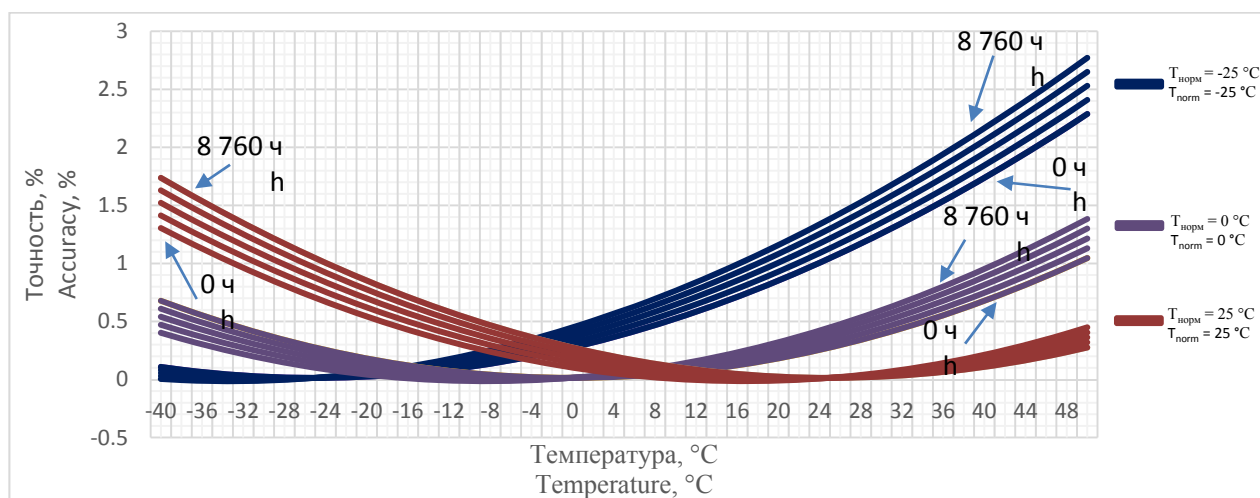


Рис. 7. График влияния температуры на техническое качество электрических КИП цифровой системы

Fig. 7. Temperature effect on technical performance of digital electrical CMI

Практическая значимость сформированной математической модели в области технического качества электрических КИП

Разработанная математическая модель позволяет количественно оценивать, насколько результаты электрических измерений искажаются при длительном воздействии температуры в процессе эксплуатации КИП. При небольших изменениях температурного режима отклонения незначительны и остаются в пределах паспортной точности, однако при приближении к граничным значениям влияние внешней среды становится определяющим фактором, вызывая устойчивое снижение точности. Особенно критичными оказываются случаи длительной работы при высоких температурах. В таких условиях отдельные элементы АСТ КИП претерпевают необратимые изменения, что приводит к значительному снижению технического качества приборов. Для цифровых систем проявления выражены слабее, однако долговременные эффекты всё равно приводят к накапливающемуся дрейфу характеристик.

Представленная модель ориентирована на прогнозирование и оценку изменения точности электрических КИП при длительном термическом воздействии. Ее результаты могут быть полезны производителям измерительных приборов для более информативного описания температурных характеристик и уточнения допустимых режимов эксплуатации еще на стадии проектирования; проектировщикам производственных объектов и электроэнергетических установок для выбора оборудования, максимально устойчивого к температурным колебаниям, что позволит замедлить снижение точности измерений и увеличить срок службы приборов; метрологическим организациям для применения

модели в процессе поверки и аттестации, а также при корректировке межповерочных интервалов в зависимости от фактических условий эксплуатации; эксплуатирующим организациям для объективной оценки текущего состояния приборов и принятия решений о необходимости замены, перенастройки или изменения условий работы.

Ценность модели заключается в ее объективизации количественной оценки качества КИП. На основе полученных зависимостей можно точнее определить оптимальные температурные режимы эксплуатации, выявить риск выхода точности за пределы допустимой погрешности. В случае эксплуатации в экстремальных условиях модель позволяет обосновать необходимость изменения межповерочных интервалов и использования приборов повышенной термостабильности.

Таким образом, практическое применение модели направлено на управление рисками снижения точности приборов под воздействием температуры, повышение надежности их работы и обеспечение сохранения качества измерений в пределах установленных норм.

Выводы

1. Проведено исследование долговременного температурного воздействия на электрические КИП, подтверждающее, что температура является одним из ключевых факторов деградации их электрических, магнитных и механических узлов. В качестве основы взяты реальные климатические условия эксплуатации, что делает результаты максимально приближенными к практике. Определены основные уязвимые элементы приборов: для электрической части – резистивные элементы и ТКС, для магнитной части – постоянные магниты и ТКМИ, для механической

части – возвратные пружины и развиваемый ими момент.

2. Разработаны математические зависимости для описания долговременной деградации каждого параметра на основе уравнения Аррениуса. Уравнение позволило учесть физико-химическую природу процессов старения, связанных с окислением, диффузией, изменением структуры материалов. Это позволило сформировать экспоненциальные зависимости изменения сопротивления, магнитной индукции и упругости пружины во времени.

3. Сформирована комплексная математическая модель, учитывающая специфику работы АСТ и цифровых КИП. Для АСТ-приборов модель включает сопротивление, ТКС, магнитную индукцию, ТКМИ и момент пружины, для цифровых систем – сопротивление, ТКС и тепловой шум Джонсона – Найквиста.

4. Проведено моделирование долговременного воздействия температуры +50 °С в течение одного года (8760 ч). Установлено, что погрешность КИП АСТ системы возрастает до 0,6837 %, а цифровых приборов – до 0,2552 %. Эти результаты показывают, что механические и магнитные узлы существенно чувствительнее к температурным изменениям, чем электронная часть цифровых устройств.

5. Определено, что точка нормальной температуры эксплуатации $T_{\text{норм}}$ является критически важным ориентиром для сохранения метрологической стабильности. Смещение этой точки даже на 10...15 °С приводит к заметному росту погрешности, особенно для АСТ-приборов.

6. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной модели при проектировании приборов для выбора материалов с минимальной температурной деградацией, планировании режимов эксплуатации в различных климатических условиях, обосновании сокращения или увеличения межповерочных интервалов диагностики состояния приборов и разработке регламентов обслуживания.

7. Сильной стороной предложенной модели является ее физическая основа, описывающая прямую связь температуры с изменением электрических, магнитных и механических характеристик, что делает ее универсальным инструментом для прогнозирования качества работы приборов.

8. Сформированная модель обладает перспективой использования производителями измерительной техники, эксплуатирующими организациями, метрологическими службами и проектировщиками объектов электроэнергетики. Результаты моделирования могут служить объективной оценкой при аттестации приборов, а также основанием для корректировки условий эксплуатации или изменения межповерочных интервалов.

Библиографические ссылки

1. *Suqin X., Jiahai Z., Baoliang Z., Guodong S., Zhen C., Jia Q., Yongquan S.* (2021) Effects of Environmental and Electrical Factors on Metering Error and Consistency of Smart

Electricity Meters. Applied Sciences, no. 11. DOI: 10.3390/app112311457

2. *Бобрышов А. П., Солёный С. В., Кузьменко В. П.* Анализ и оценка ключевых конструктивных особенностей, определяющих качество электрических контрольно-измерительных приборов // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 4. С. 5–13.

3. *Зимица П. С., Печерская Е. А.* Исследование температурной зависимости сопротивления проводников электрического тока // Инжиниринг и технологии. 2025. Т. 10, № 1. С. 63–67. DOI: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-15

4. *Marangoni T.A., Benny G., Borup K.A., Hansen O., Petersen D.H.* (2021) Determination of the temperature coefficient of resistance from micro four point probe measurements. Journal of Applied Physics, no. 16. DOI: 10.1063/5.0046591

5. *Филимонов С. С.* Магнитные полупроводники для эффективных термоэлектрических преобразователей энергии // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2021. № 10. С. 44–45. EDN IPNMFS

6. *Манаков Н. А., Еремин А. М., Чирков Ю. А.* Особенности магнитных свойств быстрозакаленных микрокристаллических сплавов на основе редкоземельных металлов // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 2(48). С. 34–39. DOI: 10.25699/SSSB.2023.48.2.013. EDN OQIKHV

7. *Zhang Tu, Yiliang Lv., Liang Li.* (2021) Study on the Effect of Temperature on Magnetization of Permanent Magnet. IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), 2021. DOI: 10.1109/CIYCEE53554. 2021.9676949

8. *Козлов В. А.* Силовая полупроводниковая электроника и микроэлектроника: полупроводниковые материалы, технологии, компонентная база // Наноиндустрия. 2021. Т. 14, № S7(107). С. 882–883. DOI: 10.22184/1993-8578. 2021.14.7s.882.883. EDN IDNNZX.

9. *Рузев Ш.* Восстановление упругости пружин методом термомеханической обработки // Общество и машиностроение. 2020. № 1. DOI: 10.47689/2181-1415-voll-iss1/spp1-7

10. *Cyrulies E.* (2023) The effect of temperature on the coefficient of elasticity of a spring: Construction of a device for its determination and calculation of its internal energy as a training practice. European Journal of Physics, no. 2. DOI: 10.1088/1361-6404/acb46f

11. Механизмы возникновения температурных погрешностей тонкопленочных резистивных структур / А. А. Рыжов, С. А. Гурин, М. Д. Новичков [и др.] // Надежность и качество : труды международного симпозиума. 2025. Т. 2. С. 385–389. EDN LJWCLO

12. *Литвишков Ю. Н.* О физическом смысле параметров уравнения Аррениуса // Kimya Problemləri. 2019. С. 456–464. DOI: 10.32737/2221-8688-2019-3-456-464

13. *Добрышкин А. Ю., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О.* Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга // Труды МАИ. 2020. № 115. С. 2.

14. *Кочетков А. В., Федотов П. В.* Уравнение состояния газа и модель идеального газа // Вестник Евразийской науки. 2017. Т. 9, № 3. С. 57.

15. *Шарунов М. Л.* Исследование сопротивления и удельного сопротивления медных проводов в зависимости от температуры // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия: Естественные науки. 2025. № 2-3(138). С. 78–83. EDN TLHZBN

16. *Suqin X., Jiahai Z., Baoliang Z., Guodong S., Zhen C., Jia Q., Yongquan S.* (2021) Effects of Environmental and Electrical Factors on Metering Error and Consistency of Smart Electricity Meters. Applied Sciences, no. 11. DOI: 10.3390/app112311457

17. Ремизова В. М. Электрическая проводимость полупроводников // Университетская наука. 2021. № 1 (11). С. 174–176. EDN TDKTUM

18. Корячко М. В., Попов А. Ю., Авдонин Д. Е. К вопросу термической устойчивости межсоединений полупроводниковых приборов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2024. № 7. С. 131. EDN GWQZVH

19. Магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса в структуре ИЖГ/ниобат лития/кремний / М. И. Бичурин, О. В. Соколов, С. В. Иванов, И. Ю. Марков // Челябинский физико-математический журнал. 2025. Т. 10, № 2. С. 207–215. DOI: 10.47475/2500-0101-2025-10-2-207-215. EDN PBFTHZ

20. Бобрышов А. П. Математическая модель зависимости точности электрических измерительных приборов от температурных воздействий: экспериментальное исследование и моделирование // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 2. С. 4–21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-4-21

21. Карасева У. П., Фрейдин А. Б. Релаксация напряжений и структуры в неравновесном вязкоупругом материале // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов: в 4 томах. Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. С. 895–897. EDN PKQNWT.

References

1. Suqin X., Jiahai Z., Baoliang Z., Guodong S., Zhen C., Jia Q., Yongquan S. (2021) Effects of Environmental and Electrical Factors on Metering Error and Consistency of Smart Electricity Meters. *Applied Sciences*, no. 11. DOI: 10.3390/app112311457

2. Bobryshov A.P., Solenyi S.V., Kuzmenko V.P. (2024) [Analysis and Assessment of Key Design Features Determining the Quality of Electrical Control and Measuring Instruments]. *Innovative Instrument Making*, vol. 3, no. 4, pp. 5-13 (in Russ.).

3. Zimina P.S., Pecherskaya E.A. (2025) [Study of the Temperature Dependence of the Resistance of Electric Current Conductors]. *Engineering and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 63-67. DOI: 10.21685/2587-7704-2025-10-1-15 (in Russ.).

4. Marangoni T.A., Benny G., Borup K.A., Hansen O., Petersen D.H. (2021) Determination of the temperature coefficient of resistance from micro four point probe measurements. *Journal of Applied Physics*, no. 16. DOI: 10.1063/5.0046591

5. Filimonov S.S. (2021) [Magnetic semiconductors for efficient thermoelectric energy converters]. *Electrical Equipment: Operation and Repair*, no. 10, pp. 44-45. EDN IPNMFS (in Russ.).

6. Manakov N.A., Eremin A.M., Chirkov Yu.A. (2023) [Features of magnetic properties of rapidly quenched microcrystalline alloys based on rare-earth metals]. *South Siberian Scientific Bulletin*, no. 2 (48), pp. 34-39. DOI: 10.25699/SSSB.2023.48.2.013. EDN OQIKHV (in Russ.).

7. Zhang Tu, Yiliang Lv., Liang Li. (2021) Study on the Effect of Temperature on Magnetization of Permanent Magnet. *IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, 2021. DOI: 10.1109/CIYCEE53554. 2021.9676949

8. Kozlov V.A. (2021) [Power semiconductor electronics and microelectronics: semiconductor materials, technologies,

component base]. *Nanoindustry*, vol. 14, no. S7(107), pp. 882-883. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.882.883. EDN IDNNZX (in Russ.).

9. Ruziev Sh. (2020) [Restoring the elasticity of springs by thermomechanical processing]. *Society and Mechanical Engineering*, no. 1. DOI: 10.47689/2181-1415-vol1-iss1/s-pp1-7 (in Russ.).

10. Cyrulies E. (2023) The effect of temperature on the coefficient of elasticity of a spring: Construction of a device for its determination and calculation of its internal energy as a training practice. *European Journal of Physics*, no. 2. DOI: 10.1088/1361-6404/acb46f

11. Ryzhov A.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. [et al.] (2025) [Mechanisms of occurrence of temperature errors in thin-film resistive structures]. *Proceedings of the international symposium "Reliability and Quality"*, vol. 2, pp. 385-389. EDN LJWCLO (in Russ.).

12. Litvishkov Yu.N. (2019) [On the physical meaning of the parameters of the Arrhenius equation]. *Kimya Problemlari*, pp. 456-464. DOI: 10.32737/2221-8688-2019-3-456-464 (in Russ.).

13. Dobryshkin A.Yu., Sysoev O.E., Sysoev E.O. (2020) [Experimental study of the influence of temperature on Young's modulus]. *Proceedings of MAI*, no. 115, pp. 2 (in Russ.).

14. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. (2017) [Equation of state of gas and the ideal gas model]. *Bulletin of Eurasian Science*, vol. 9, no. 3, p. 57 (in Russ.).

15. Sharipov M.L. (2025) [Study of resistance and resistivity of copper wires depending on temperature]. *Bulletin of Bokhtar State University named after Nosir Khusrav. Series of Natural Sciences*, no. 2-3(138), pp. 78-83. EDN TLHZBN (in Russ.).

16. Suqin X., Jiahai Z., Baoliang Z., Guodong S., Zhen C., Jia Q., Yongquan S. (2021) Effects of Environmental and Electrical Factors on Metering Error and Consistency of Smart Electricity Meters. *Applied Sciences*, no. 11. DOI: 10.3390/app112311457

17. Remizova V.M. (2021) [Electrical conductivity of semiconductors]. *University Science*, no. 1 (11), pp. 174-176. EDN TDKTUM (in Russ.).

18. Koryachko M.V., Popov A.Yu., Avdonin D.E. (2024) [On the Issue of Thermal Stability of Interconnections of Semiconductor Devices]. *Modern Problems of Radioelectronics and Telecommunications*, no. 7, p. 131. EDN GWQZVH (in Russ.).

19. Bichurin M.I., Sokolov O.V., Ivanov S.V., Markov I.Yu. (2025) [Magnetolectric Effect in the Region of Magnetoacoustic Resonance in the Structure of IZHG/Lithium Niobate/Silicon]. *Chebyabinsk Journal of Physics and Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 207-215. DOI: 10.47475/2500-0101-2025-10-2-207-215. EDN PBFTHZ (in Russ.).

20. Bobryshov A.P. (2025) [Mathematical model of the dependence of the accuracy of electrical measuring instruments on temperature effects: experimental study and modeling]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2, pp. 4-21. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-4-21 (in Russ.).

21. Karaseva U.P., Freidin A.B. (2023) [Stress relaxation and structure in a nonequilibrium viscoelastic material]. *XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics: collection of abstracts: in 4 volumes*, St. Petersburg, August 21-25, 2023. Saint Petersburg: Politech-Press Publishing, pp. 895-897. EDN PKQNWT (in Russ.).

Mathematical Model of Long-Term Temperature Effects on the Functioning Quality of Electrical Measuring Instruments: Research and Modeling

A.P. Bobryshov, Post-graduate, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

The assessment of long-term stability of electrical measuring instruments (EMI) is a complex task associated with the influence of external factors, where the ambient temperature is the most significant one. Prolonged temperature exposure leads to degradation processes in the electrical, magnetic, and mechanical components of measuring devices (MD), resulting in their accuracy decrease. The main objective of this study is to develop a mathematical model describing the long-term thermal effects on the technical quality of EMI. Unlike the author's previously proposed model of short-term effects, the present work focuses on the description of irreversible thermal processes. The developed model considers the changes in resistance and temperature coefficient of resistance (TCR), magnetic induction and temperature coefficient of magnetic induction (TCMI), as well as the elasticity and torque of the return spring in analog-pointer (APT) instruments. To describe the dynamics of degradation processes the Arrhenius equation was employed as the basis, enabling the dependency derivation to assess the accuracy parameter variation with time. Simulation results provided accuracy curves for both APT and digital systems. The findings demonstrate that mechanical and magnetic components are more sensitive to thermal effects compared to the electronic parts of digital measuring devices. The proposed model and methodology allow predicting the decline of technical quality of EMI under real operating conditions, accounting for climatic factors when selecting equipment, and adjusting calibration intervals depending on environmental conditions. The practical significance of this work lies in the possibility of integrating the developed tools into quality assessment systems for EMI, thereby improving operational reliability and providing a more objective quantitative evaluation of their condition.

Keywords: long-term temperature effect, electrical measuring instruments, mathematical model, measurement accuracy, component degradation, Arrhenius equation.

Получено 04.09.2025

Образец цитирования

Бобрышов А. П. Математическая модель долговременного температурного воздействия для диагностики электрических контрольно-измерительных приборов: исследование и моделирование // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 67–77. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-67-77

For Citation

Bobryshov A.P. (2026) [Mathematical Model of Long-Term Temperature Effects on the Functioning Quality of Electrical Measuring Instruments: Research and Modeling]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 67-77. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-67-77 (in Russ.).