

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК658.562.64

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-4-21

Математическая модель зависимости точности электрических измерительных приборов от температурных воздействий: экспериментальное исследование и моделирование

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

Оценка качества продукции или услуги является сложной задачей с точки зрения сбора и обработки данных. Для электрических контрольно-измерительных приборов одним из ключевых параметров, влияющих на качество работы, является влияние внешних условий, одно из которых – температура окружающей среды. Поскольку измерительное устройство является сложным конструктивным изделием, влияние температуры необходимо оценивать комплексно на весь механизм отображения электрических данных. Ключевой задачей данного исследования является построение математической модели, характеризующей кратковременное влияния внешнего воздействия температуры на общую конструкцию, работу и качество электрических контрольно-измерительных приборов. Представленная в исследовании модель учитывает изменение внутренних сопротивлений прибора, изменение магнитной индукции магнита и динамику перестроения характеристики используемой пружины возвратного механизма стрелочно-аналогового измерительного устройства. По результатам модели были представлены графики влияния различной температуры на погрешности электрических измерений. Было определено, что при работе в граничных режимах значения близкие к нормирующей величине превышают допустимую погрешность прибора. Представленную модель предлагается использовать в качестве инструмента для оценки, отслеживания и корректировки отклонений, а также более точного определения уровня качества измерительных устройств, подверженных температурному воздействию. Результаты модели характеризуются объективной количественной оценкой и могут быть применены в вопросах аттестации и корректировки межповерочного интервала. Согласно замерам температурных режимов и основных параметров приборов можно произвести моделирование и оценить дальнейшее воздействие температуры на его итоговую точность.

Ключевые слова: электрические контрольно-измерительные приборы, точность и отклонение измерений, температурное воздействие, математическая модель.

Введение

Корректное функционирование электрических контрольно-измерительных приборов (КИП), а именно осуществление измерений электрической величины, зависит от перечня условий. Отклонение от предъявляемых требований – причина искажения фиксируемых данных, в некоторых случаях даже превышающего установленные паспортные рамки. С точки зрения допустимых отклонений можно утверждать, что прибор является годным к эксплуатации при определенных условиях окружающей среды, отличающихся от заявленных в паспорте прибора. При этом если рассматривать данный случай с точки зрения технического качества,

невозможно утверждать о полном соответствии корректности работоспособности измерительного устройства (ИУ). Техническое качество характеризуется полнотой выполнения продукцией или услугой заявленного функционала в полном соответствии установленным требованиям. Комплексно для электрических КИП параметр точности характеризует полноту выполнения заявленного функционала.

Качество является комплексным параметром, подразумевающим различные степени соответствия установленным условиям. Для каждого ИУ устанавливается своя точность, а приборы могут иметь различную среднюю приведенную погрешность в рамках данной точности. Учитывая данные факты можно

сказать, что для более корректного и точного описания электрических КИП, степень качества будет разделяться на условные уровни, описывающие, насколько качественно прибор выполняет свой заявленный функционал. Данным методологическим комплексом количественной оценки занимается наука квалиметрия, осуществляющая объединение и учет влияющих факторов. На данный момент оценка описанных уровней осуществляется в большей степени субъективно, разделяя температурные границы с учетом рабочего опыта специалистов и в целом обеспеченных условий работы приборов. Данный факт определяет необходимость в формировании математических инструментов позволяющих осуществить и выделить объективную оценку, тем самым формируя определенную шкалу, используя которую возможно с большей степенью точности сравнивать и устанавливать уровень качества ИУ в соответствующих оценочных моделях.

Главными влияющими факторами на качество электрических измерений и работы КИП является окружающая рабочая среда. Данные требования описаны не только в государственных стандартах, но и в технической документации на устройство, а также рассматриваются в научно-исследовательской сфере [1]. Стоит отметить, ключевое разделение электрических ИУ на две системы – цифровую и аналоговую. При этом, несмотря на отличие в функционировании таких приборов, во всех условиях эксплуатации установлены граничные рамки температурных режимов работы. Влияние температуры может оказывать значительное воздействие на измерительную систему, фальсифицируя данные через нарушение корректности работы конструкции прибора.

Исследования научной литературы и методических источников по тематикам температурного воздействия на работу электрических КИП ограничиваются допустимыми граничными требованиями к данной величине. Полноценные модели, описывающие физику процесса и динамику технического качества работы приборов и отображения измерений, ограничиваются математическими аппаратами, исследованиями и графическими характеристиками для отдельных элементов конструкции ИУ. Подходя к вопросу разработки

моделей термического воздействия, стоит отметить, что все исследования упираются на устройство и компонентные элементы изучаемых приборов. Учитывая данный факт, как основные элементы можно выделить три основных компонента в конструкции, для которых исследовательская база воздействия температуры в большей степени проработана [2]. Например, для используемого в конструкции приборов сопротивления справедлива зависимость и коэффициенты, описывающие изменение сопротивления в зависимости от величины влияющей температуры [3–5]. Сопротивление является важным элементом в цепи электрических КИП, напрямую влияющим на работу ИУ, понимание динамики ее изменения способствует определению величины отклонений, проявляющихся при работе прибора под действием внешней температуры [6, 7]. Дополнительно стоит определить, что при термическом воздействии изменяются резистивные свойства и других элементов цепи, например проводников, но при этом необходимо понимать и учитывать геометрические параметры и свойства элемента. Дополнительно в направлении оценки и исследования влияния температуры на компонентную базу КИП можно выделить исследования термического воздействия на магнитную индукцию постоянного магнита [8–10]. Магнитные свойства постоянного магнита также сильно подвержены воздействию температуры, что подтверждают многочисленные исследования в области электрических машин, но в большей степени через графические зависимости высоких температур, превышающих 100 С [11, 12]. Также стоит выделить исследования воздействия температуры на жесткость пружины, используемой в конструкции стрелочных ИУ [13–16]. В теории метрологии и основ электрических измерений приводится основная зависимость, определяющая механический момент вращения стрелки прибора, учитывающая конструктивные особенности электрических КИП [17, 18].

Согласно проведенному литературному и методическому анализу общая функциональная зависимость, учитывающая особенности конструкции, температурный режим работы приборов, теоретически показывающая проявление, уменьшение, увеличение погрешностей, отсутствует. Представление дан-

ной зависимости позволит более точное произвести разграничение уровней качества работы КИП при различных температурных условиях. По результатам исследований в области влияния температуры на сопротивление, магнитную индукцию постоянных магнитов и жесткость пружин можно через основные соотношения произвести определение зависимости, описывающей термическое воздействие на всю конструкцию.

Цель исследования – изучение кратковременного влияния различной температуры на работу электрического КИП и описание данного воздействия в формате теоретической зависимости.

Качество электрических контрольно-измерительных приборов и измерений

Как уже было описано, качество является понятием, характеризующим полноту выполнения заявленного функционала. Данное описание полностью соответствует термину из стандарта на основные понятия качества продукции. В рассматриваемом стандарте качество продукции описывается как совокупность свойств продукции, а свойство продукции является объективной особенностью продукции, проявляющаяся при ее создании, эксплуатации или потреблении. Также стандартом устанавливаются понятия показателя качества продукции, например единичный, комплексный, определяющий или интегральный. Единичный параметр описывает определенное свойство, комплексный – относится к совокупности свойств, определяющий – является ключевым к принятию решений по степени качества, а интегральный – своеобразной мерой оценки полезности к общим затратам. Таким образом, можно отметить, что точность электрических ИУ является средневыведенным значением, в большей степени относящимся к определяющему показателю качества, поскольку именно на него ориентируются при плановой поверке. При этом средняя точность имеет отношение и к комплексному показателю, но в меньшей степени, поскольку явно может относиться только в случае сертифицированной поверки, при полном соблюдении нормальных внешних условий. Дополнительно к оценке качества измерений и электрических КИП стоит отнести наличие единичных значений в выборке плановой аттестации,

выходящих за рамки паспортной точности. Такие значения сложно учитывать, поскольку они могут являться случайными выбросами, но в то же время данные явления могут говорить о скрытой, нелинейной неисправности в конструкции прибора. Данный показатель больше подходит по определению к единичному, описывающему вероятностную ошибку.

Рассматривая процедуру электрических измерений, учитывая основные термины качества, можно с уверенностью заявить, что в большей степени качество электрических измерений зависит от двух составляющих – от самого КИП и условий фиксации данных или окружающей среды. При этом следует понимать, что внешние воздействия влияют на измерения через конструкцию ИУ, внося изменения в нормальную работу прибора. Для начала стоит определиться с условиями и, что более важно, с перечнем требований к нормальному функционированию электрических КИП.

Проводя анализ технической документации к различным электрическим ИУ, отличающимся типом, видом, системой и др., стоит выделить следующие общие условия работы измерительных приборов: температура, влажность воздуха, величина питающего напряжения, частота, степень пылевлагозащиты. Обращаясь к документации, регламентирующей условия поверки электрических КИП, можно выделить следующие условия: нелинейность искажения цепи питания по частоте напряжению и току, температуру, влажность, давление, вибрацию, дополнительно выделяют влияние внешнего электромагнитного поля. Во всех случаях и в большинстве условий технических характеристик отдельно и наиболее часто выделяют влияние температуры на электрические КИП.

Данный показатель стоит рассмотреть более детально с точки зрения качества. Паспортом к ИУ всегда предусмотрены условия эксплуатации устройства в виде списка требуемых параметров или их рамок. Так, для температуры всегда устанавливается диапазон значений для нормальной эксплуатации. Важно отметить, что в документации отсутствует пояснение для степени влияния той или иной величины в рамках допустимого диапазона значений на работу КИП и величину прояв-

ляющихся отклонений от воздействия температуры. Можно выделить два сценария для объяснения данного явления. Первый сценарий: в установленных температурных диапазонах прибор будет функционировать корректно без проявления погрешностей. Второй сценарий: в данных рамках будут проявляться погрешности, но критичные отклонения, превышающие паспортную точность, будут возникать только после превышения данных границ. В рамках первого сценария можно утверждать, что превышение установленного температурного параметра не влечет за собой моментального роста установленной точности, отклонения будут расти по определенной зависимости, не обязательно линейной, и только в конкретный момент превысят допустимое значение точности. В связи с этим возникает вопрос, при каком значении отклонения будут критичными и как стоит классифицировать отклонения, а именно какая степень влияния температуры до ее граничного параметра, т. е. какие и сколько качественных рамок термического воздействия возможно выделить. Второй сценарий предполагает, что при достижении граничных рамок отклонения будут превышать допустимую точность, но и в данном случае возникает вопрос о степени влияния различной величины температуры на погрешности до достижения данных рамок. В обоих случаях можно говорить о степени влияния или динамике проявления отклонений при разной температуре: каким будет качество измерений при определенном термическом влиянии. Это крайне важно для справедливой и точной оценки работоспособности КИП в определенных условиях окружающей среды. Отсюда можно утверждать, что на данный момент существует необходимость в доработке оценочной, качественной, стороны определения уровня влияния температуры. Данную оценку можно применять в моделях оценки качества, но при этом она должна быть объективной, научно и технически обоснованной.

Рабочие условия эксплуатации электрических контрольно-измерительных приборов

Электрические КИП могут быть установлены в различных комплексах и объектах, где условия температуры будут сильно отличаться. Конечно, при проектировании объекта

и его оснащении приборами для корректного функционала тщательно подбираются все компоненты согласно условиям работы. Но стоит отметить, что температура может динамически изменяться ввиду характера работы объекта, а также в принципе объект может работать в режимах, которые обеспечивают температуру окружающей среды для ИУ близкую к паспортному максимуму или минимуму. Продолжительное воздействие на параметры может также оказать искажающее воздействие на работу электрического КИП. Подтверждением данного предположения является блок электростанции теплового типа, температура в котором может отличаться на 10...20 градусов в зависимости от времени года по причине замкнутости помещения и близости к источнику тепла в виде печей. В качестве примера можно привести Ставропольскую государственную районную тепловую электростанцию (ГРЭС), с 1984 года использующую природный газ в качестве топлива для печей. Дополнительным фактором являются расположение станции на юге России и погодные условия в Изобильненском районе поселка Солнечнодольск, являющемся местом расположения станции. На рисунке 1 приведен график диапазона средней температуры дня и ночи за каждый месяц в поселке Солнечнодольск в период с 2019 по 2023 год. Дополнительно на рисунке 2 приведен график осадков в данном регионе за такое же время.

Проводя анализ, можно отметить наиболее высокую температуру в период с начала мая и до конца сентября ежегодно. В разные годы за данный период в разные месяцы летнего сезона средняя температура достигает до 36...37 °С. В 2021 и 2020 годах максимальная средняя температура достигала до 39 °С в июле, что может говорить о том, что в отдельных местах температура могла составлять до +40 °С. При этом на данном временном участке на графике осадков можно отметить явное снижение числа дождливых дней, особенно в августе месяце. Дополнительно стоит отметить неравномерность данных осадков, что говорит о снижении влияния на температуру окружающей среды в области расположения станции. Стоит сделать акцент на том, что график осадков хотя и отражает картину низкого количества прохладных дней в преимущественно в летний период в обла-

ти поселка Солнечнодольск, в действительности выпадение осадков может быть весьма

узколокальным и непродолжительным, что подтверждается эмпирическим наблюдением.

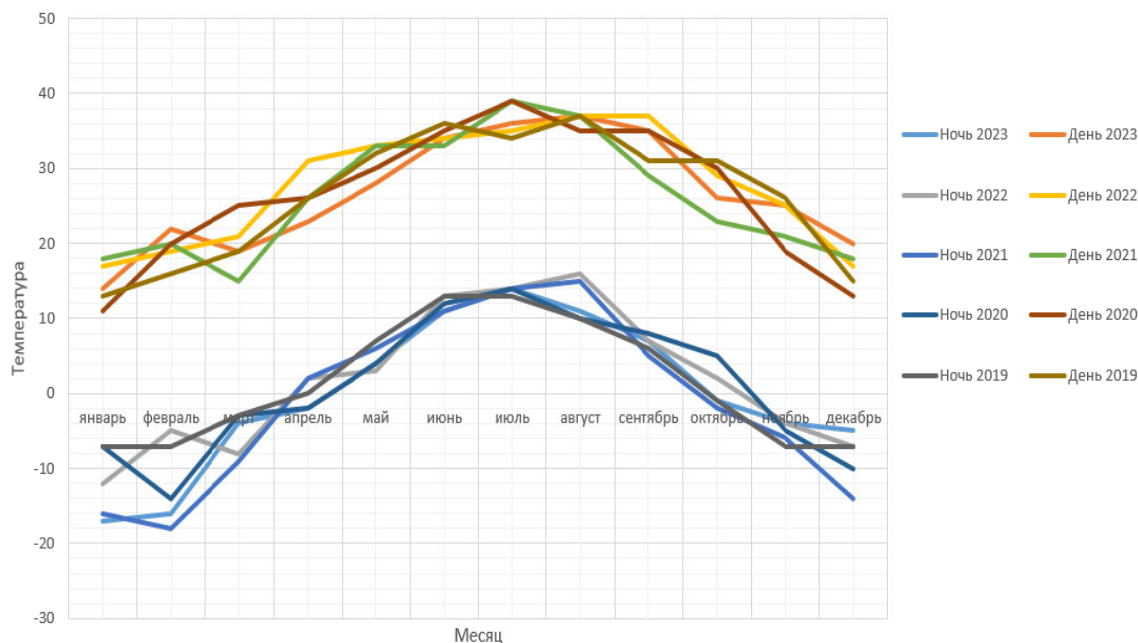


Рис. 1. График диапазона температуры в поселке Солнечнодольск за год

Fig. 1. Graph of temperature range in Solnechnodolsk settlement for the year

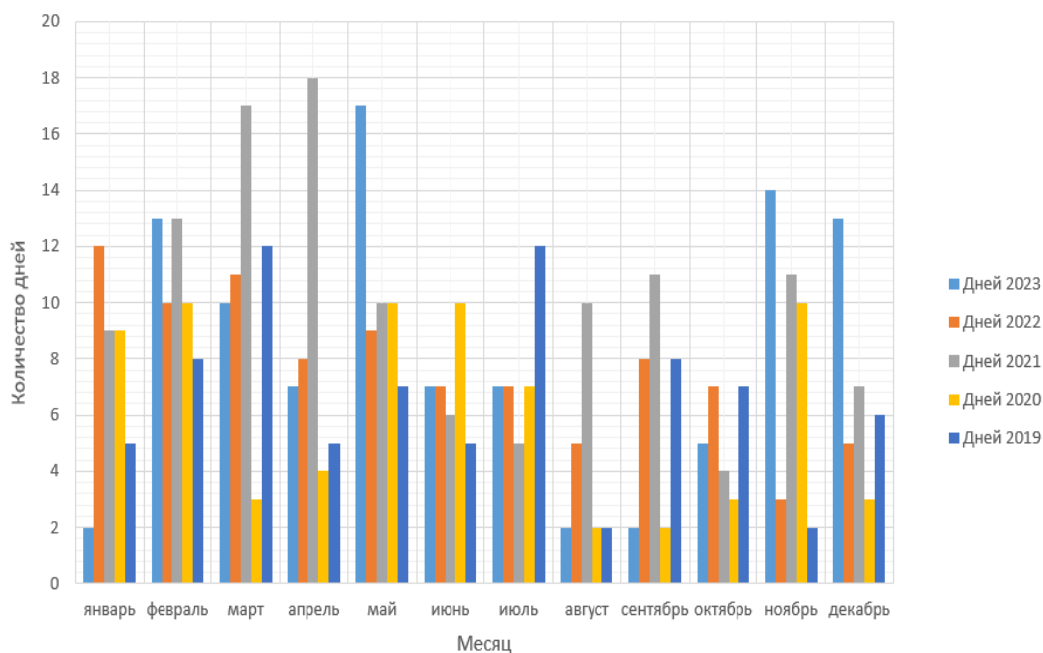


Рис. 2. График дней осадков в поселке Солнечнодольск за год

Fig. 1. Graph of days of precipitation in Solnechnodolsk settlement for the year

Беря во внимание высокий нагрев от работы печи по сжиганию газа для турбин ГРЭС, высокие показатели температуры окружающей среды в течение половины года и закрытое помещение блока, можно предположить

о средней температуре в блоке от $+45^{\circ}\text{C}$ и выше. В данных условиях для контроля электрических параметров в блоке устанавливаются электрические КИП, для которых такая температура может находиться как в ра-

бочем диапазоне, так и быть приближенной к максимальному температурному порогу или превышать его.

Существует большое количество производств, эксплуатирующих электрические ИУ в условиях, близких к критическим. При этом контроль температуры практически всегда сложно учитывать для электрических КИП, поскольку формально и фактически рабочая обстановка соблюдается полностью, но стоит брать во внимание воздействие таких условий на измерительную аппаратуру.

Особенности типов и конструкции электрических контрольно-измерительных приборов в промышленности

Четвертая промышленная революция диктует совершенно новые условия, обеспечивая массовое внедрение информационных технологий в промышленность. Для достижения технологического государственного суверенитета данное направление поддерживается законопроектами (Постановление Правительства Российской Федерации от 02.03.2019 № 234 (ред. от 01.08.2024) «О системе управления реализацией национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации"» (вместе с «Положением о системе управления реализацией национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации"»)). Данные решения непосредственно затрагивают промышленные производства и область электрических измерений. Внедрение интеллектуального учета электрической энергии, анализ электрических параметров объекта и др. – все это осуществляется при помощи цифровых ИУ. Но также стоит понимать, что не все производства соответствуют установленным планам развития. Внутренняя доля производств на данный момент все также используют КИП аналоговой системы, данные приборы продолжают производиться и использоваться. Во многих случаях переход на цифровые приборы является в достаточной мере затратной процедурой, но не стоит забывать о ключевом назначении стрелочных ИУ, в рамках которых они в большинстве своем на данный момент используются. Данный функционал заключается в демонстрации рабочему персоналу электрических параметров системы, для контроля и оценки работоспособности. Даже в услови-

ях использования цифровых блоков учета параметров и обеспечения защиты на объектах используются стрелочные приборы. Ярким примером являются такие внушительные энергетические объекты, как ранее рассматриваемая Ставропольская ГРЭС и Новосибирская гидроэлектростанция (ГЭС).

Стоит отметить различия между двумя типами электрических КИП – аналогово-стрелочной и цифровой систем. Конструктивные особенности в значительной степени изменяют влияние внешних условий. Так, ИУ аналогово-стрелочной системы построены на основе взаимодействия магнитных полей внутренних элементов, в результате чего осуществляется отклонение индикационной стрелки по заранее градуированной шкале. Ключевыми узлами КИП (в зависимости от исполнения) являются: катушки электромагнита, магниты, пружины и внутренние сопротивления. Цифровые ИУ отличаются от аналоговых тем, что обеспечивают фиксацию электрических параметров системой отсчета импульсов, завязанных на сопротивлении и работе операционных усилителей или набора сопротивлений. Системы могут отличаться быстродействием, точностью, погрешностями, шагом интегрирования и др. Ключевыми узлами в устройствах такого типа являются сопротивления, операционные усилители, счетчики сигнала, генераторы опорного напряжения, емкости и индуктивности.

Отметим, что общим встречающимся элементом в КИП обеих систем является сопротивление. Изменение данного параметра может в достаточной степени изменить отображение ИУ измеряемой величины. Например, в случае аналоговых стрелочных приборов некорректное сопротивление может сказываться на искажении электромагнитного поля, генерируемого на катушках устройства. У цифрового прибора изменение значения сопротивления скажется на некорректном сравнении операционными усилителями опорных значений тока и напряжений с подаваемой на второй вход измеряемой величиной. Конечно, возможно нивелирование данного искажения через большой шаг квантования, но это является особенностью КИП низкой точности.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили чип-резисторы. Досто-

инством данных элементов является маленький размер, позволяющий сократить габариты электронной продукции [19]. Также спросом пользуются пленочные резисторы классического исполнения, ранее активно применявшиеся в схемотехнике [20]. Ключевым элементом в сопротивлении является резистивный элемент, в конструкции сопротивления могут использоваться: углерод, оксид металлов рутения, олова, никельхромовые сплавы, нитрид тантала или титана и др. В остальном резистор состоит из защитных и соединительных слоев, выполняющих, в том числе, роль отвода тепла.

В резисторах, использующих в качестве сопротивления металлические соединения, зависимость от температуры практически линейная и в основном зависит от температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Описывается зависимость выражением

$$R = R_0 (1 + \lambda(t - t_0)),$$

где R – итоговое значение температуры; R_0 – сопротивление при начальной температуре; λ – ТКС; t – текущая температура; t_0 – начальная температура.

Коэффициент ТКС для различных материалов отличается. Например, для металлов данное значение положительное, в то время как для полупроводников – отрицательное. Учитывая назначение и состав многих материалов, температурная зависимость может быть более сложной.

Затрагивая зависимость влияния температуры на сопротивление, изначально стоит определить два основных разделения в понятии температурного воздействия. Термическое влияние может иметь длительный и кратковременный характер. Данные воздействия отличаются временем влияния и изменением параметров и номиналов отдельных элементов КИП. Длительный эффект вызывает необратимые изменения в параметрах веществ, компонентов и др., в то время как кратковременный эффект изменяет параметры перечисленных элементов временно, и после восстановления температурного режима характеристики элементов восстановятся. Важным является то, что независимо от времени влияния номиналы элементов, используемых в конструкции КИП, под действием темпера-

туры в любом случае будут изменяться. При кратковременном режиме, после нормализации условий, параметры элементов ИУ придут в норму. В долговременном режиме изменение данных величины, конечно, будет необратимо, но такой эффект жестко зависит от времени влияния.

Математически форму описания кратковременного эффекта возможно выразить через зависимости изменения параметров от температуры. В большинстве случаев данный эффект зависит от температурных коэффициентов, что в целом отражает действительность. Для долговременного эффекта воздействия температуры на параметры данные зависимости не подходят по причине отсутствия параметра времени. С точки зрения необратимости изменения величины под термическим воздействием происходят как физические, так и химические изменения. Для описания данных эффектов можно использовать зависимость Аррениуса, учитывающую общую форму изменения определенной величины по экспоненте с учетом ее температурного коэффициента, в большинстве своем выраженного эмпирически [21].

Экспериментальное исследование влияния температуры на точность электрических контрольно-измерительных приборов

Для эксперимента были выбраны аналоговые стрелочные вольтметры магнитоэлектрической системы Ц42703 с 1,5%-й паспортной погрешностью, нормирующим значением 250 В и рабочим диапазоном температуры $-40...+50$ °С, имеющие в своей конструкции добавочное сопротивление. Для оценки динамики влияния температуры на функционирование КИП были проведены измерения при разных значениях температуры: +28, +40 и +50 °С. Выбор температурных режимов для экспериментальных исследований обусловлен следующими факторами: +28 °С – нормальное температурное условие работы по паспорту прибора, что должно отражать полное отсутствие воздействия температуры на работу КИП; +50 °С – верхняя граница работы прибора по паспорту. Рассмотрение работы ИУ в данном режиме обусловлено тем, что значение является граничным, поскольку температура точно оказывает нарастающее

воздействие на работу прибора. Оценить функционал в данном режиме является важной задачей для оценки качества работы устройства. В связи с этим температура $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ выбрана как близкий к граничному пределу температурный режим, имеющий внушительный запас по допуску работы; данное значение является близким к результирующему среднему, и оценка работы прибора при данной температуре покажет, насколько устройство устойчиво к значительному параметру по допустимому воздействию внешней среды. Дополнительно моделируется работа устройства в условиях замкнутого пространства производственных линий и цехов, где температура вблизи рабочих агрегатов может достигать $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примером являются ранее приведенные данные температуры на ГРЭС в период весеннего и осеннего сезонов работы в условиях близости к рабочим печам.

Нагрев ИУ осуществлялся в кратковременном режиме, но достаточно равномерно для обеспечения термического влияния. В процессе измерений рабочая температура поддерживалась постоянной для каждой точки

эксперимента. На рисунках 3 и 4 представлены термические изображения исследуемых КИП в процессе измерений.

Итоговые результаты средних приведенных погрешностей измерений составляют: $0,45699\%$ при $28\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0,55509\%$ при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0,6071\%$ при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Графики, демонстрирующие изменения погрешностей с повышением температуры, приведены на рисунке 5.

Графики демонстрируют динамику изменения отдельных погрешностей электрических измерений. На основе полученных результатов можно сделать несколько замечаний. При температуре $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ отклонения измерений показывают в достаточной степени стабильный уровень с незначительными отклонениями в отдельных случаях. Исключением являются значения, приближающиеся к нормирующей величине. Большая часть значений входит в отрицательную область. Средняя приведенная погрешность составляет $0,45699\%$. При этом ни одно измерение не вышло за рамки паспортной точности, что говорит о соответствии КИП установленным паспортным нормам.

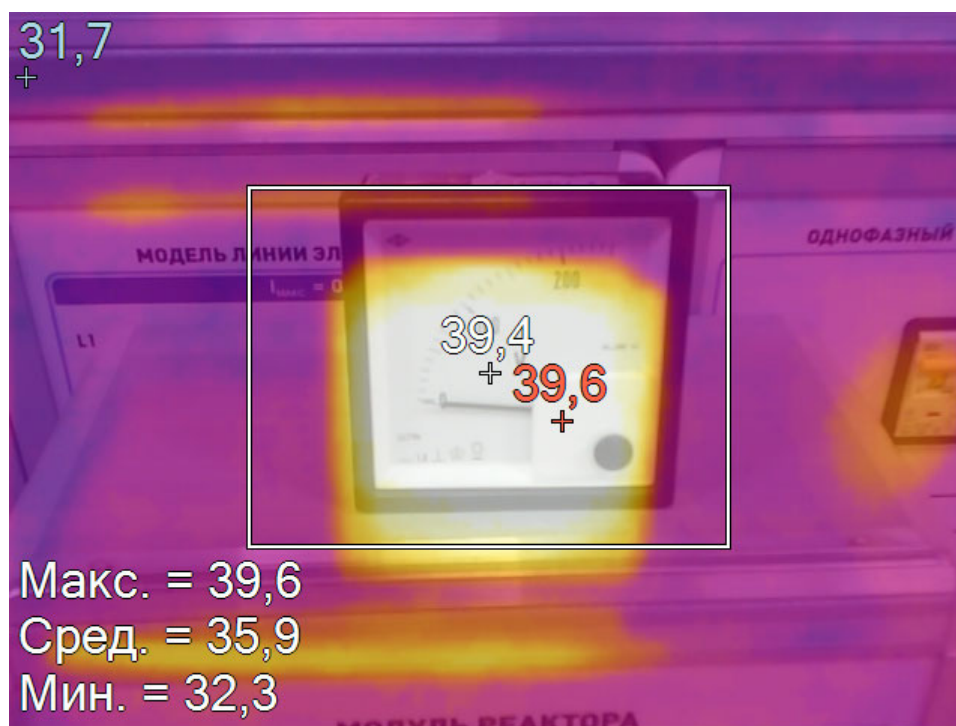


Рис. 3. Электрический контрольно-измерительный прибор при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Electrical test and measurement instrument heated to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

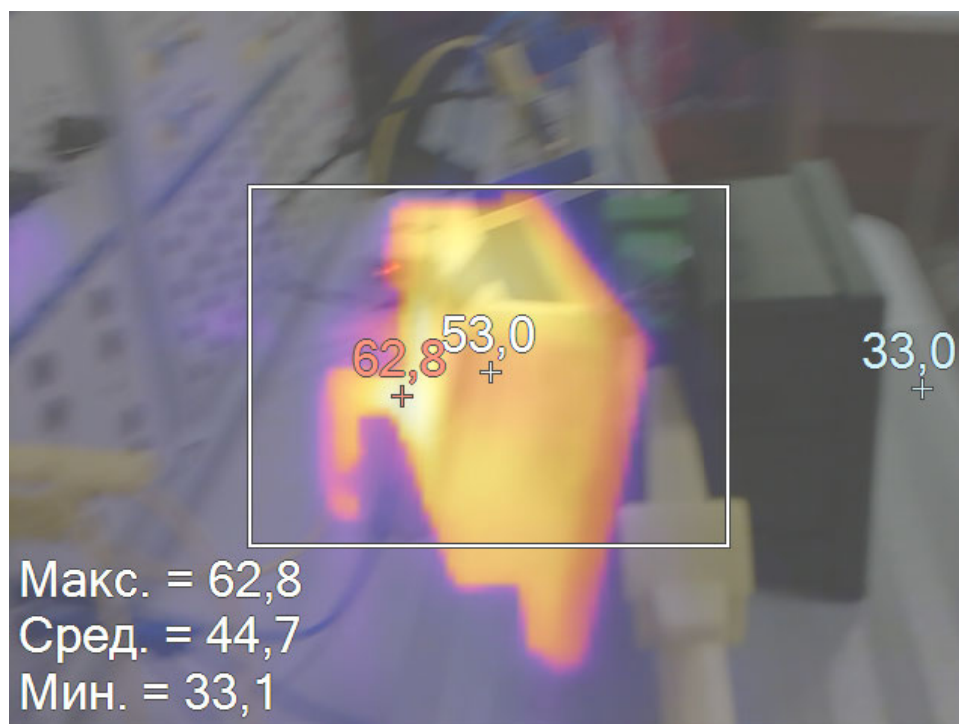


Рис. 4. Электрический контрольно-измерительный прибор при + 50 °С

Fig. 4. Electrical test and measurement instrument heated to 50 °C

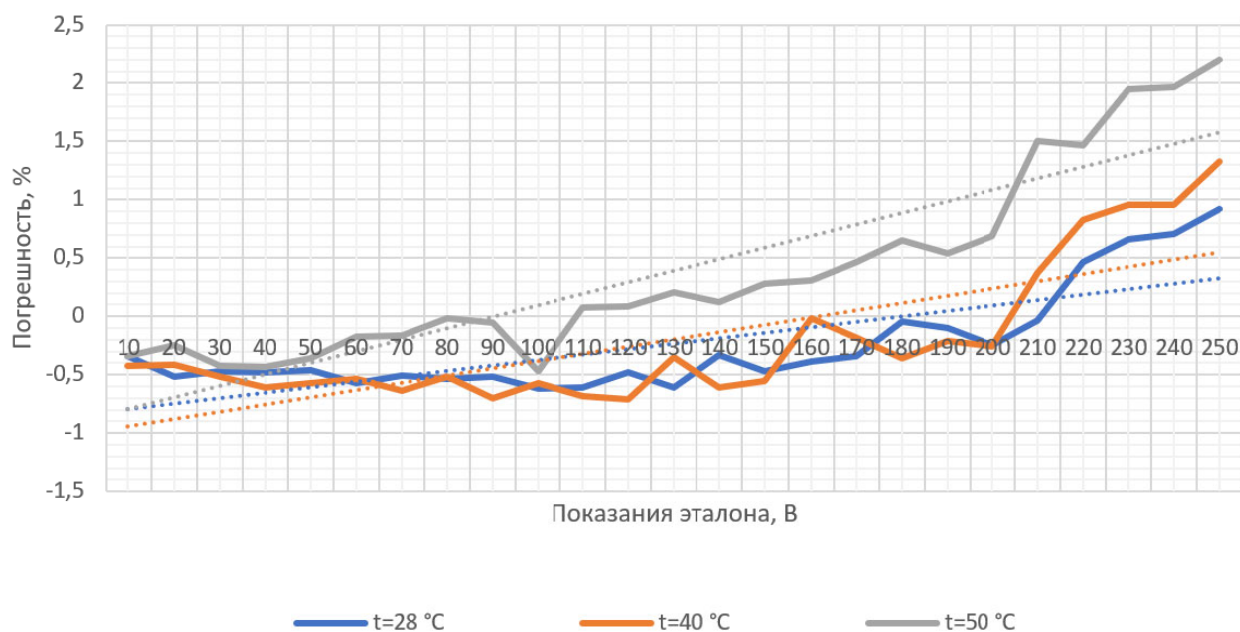


Рис. 5. Графики изменения погрешностей электрических измерений при разной температуре

Fig. 5. Graphs of variation of electrical measurement errors at different temperatures

Повышение температуры ИУ до +40 °С повлияло на работу прибора внесением значительной степени хаотичности в отклонения. Динамика погрешностей между измерениями возросла, подтверждением стало отклонение от прямой при температуре +28 °С. При при-

ближении к нормирующей величине погрешность увеличилась, значительно приблизившись к верхней границе точности. Средняя приведенная погрешность измерений составила 0,55509 %, что показывает значительный рост с учетом превышения граничной темпера-

туры, при этом ни одно измерение не вышло за установленные рамки паспортной точности.

Повышение температуры КИП до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ показало линейный рост средней погрешности. Разрыв между максимальным и минимальным отклонением стал самым большим за весь эксперимент. Можно увидеть разрыв кривых: полученные значения при работе в условиях $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ сильно отличаются от кривых при $+28$ и $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при приближении измерений к нормирующей величине три значения вышли за рамки паспортной точности. Средняя приведенная погрешность составила $0,6071\%$, что укладывается в установленные рамки допустимых отклонений. Но такой КИП нельзя принимать пригодным для работы в описанных условиях, поскольку присутствуют отдельные измерения, вышедшие за паспортные пределы.

Отдельно стоит отметить рост погрешности с изменением температуры. Увеличение точности приблизительно на $0,1\%$ между измерениями при $+28$ и $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ является показательным и самым большим за ход эксперимента. Данный факт можно объяснить близостью температурного режима $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ к граничному паспортному $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такой шаг точности между величинами может свидетельствовать о разрыве в достоверности измерений минимум на $5\ldots 10\%$, что является внушительным значением [22]. Разница между измерениями при $+40$ и $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ сокращена наполовину, но в отдельных измерениях показывает превышение рамок погрешностей. Шаг в точности равен $0,05201\%$, по оперативной характеристике данное значение соответствует разности достоверности измерений от 5% , но степень качества такого устройства является низкой, поскольку не попадает даже в область неопределенности. Поскольку за рамки паспортной точности вышли три значения, такой прибор нельзя позиционировать как годный, при этом данное явление нельзя отнести к статистическим выбросам, что говорит о системном отклонении и снижении качества измерений и работы ИУ в описанных температурных условиях.

Повышение температуры оказало воздействие на всю конструкцию электрического КИП, что ярко отражается на отклонении ре-

зультатов измерений. В большей степени воздействие было оказано на сопротивление и возвратный механизм, что и стало причиной проявления отклонений. Учитывая условия эксплуатации электрических КИП, особенности их работы, изменяющийся температурный режим работы на производствах, важность корректности электрических измерений, а также необходимость объективизации в описании влияния температуры на работу ИУ и качество измерений, устанавливается необходимость определения зависимости между температурой и погрешностью с учетом особенности конструкции электрического КИП. Целесообразно связать механизм работы прибора с ключевым качественным параметром для ИУ – средней приведенной погрешностью.

Математическая модель зависимости погрешностей от температуры

Для начала необходимо учесть особенности конструкции исследуемого электрического КИП. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием того же вольтметра магнитоэлектрической системы Ц42703. Механизм работы прибора содержит клеммы, выпрямительный мост, содержащий диоды, сопротивления, катушечную рамку, магнит и стрелку. Схема и изображение конструкции прибора представлена на рисунке 6.

Для приборов магнитоэлектрической системы существуют выведенные зависимости, описывающие внутренние процессы отображения измеряемой величины:

$$M_{\text{вр}} = BSWI;$$

$$M_{\text{ур}} = M_{\text{уд}} \alpha.$$

Здесь $M_{\text{вр}}$ – момент вращения стрелки, Н·мм, пропорционален магнитной индукции магнита B , Тл, площади рамки катушки S , мм², количеству витков обмотки W , шт., и току I , А, протекающему в катушке. Для прямого отображения измеряемой величины конструкцией КИП создается уравнивающий момент $M_{\text{вр}}$, Н·мм, равный произведению удельного момента $M_{\text{уд}}$, Н·мм, стрелки прибора на угол отклонения α , град, в результате действия момента.

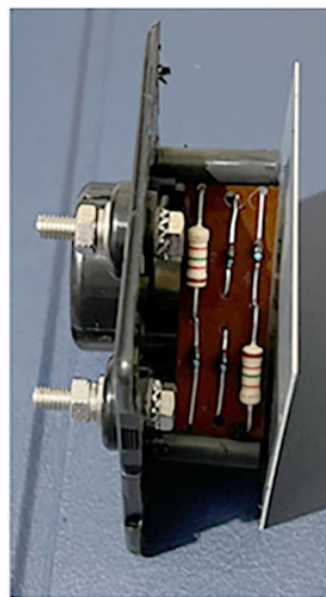
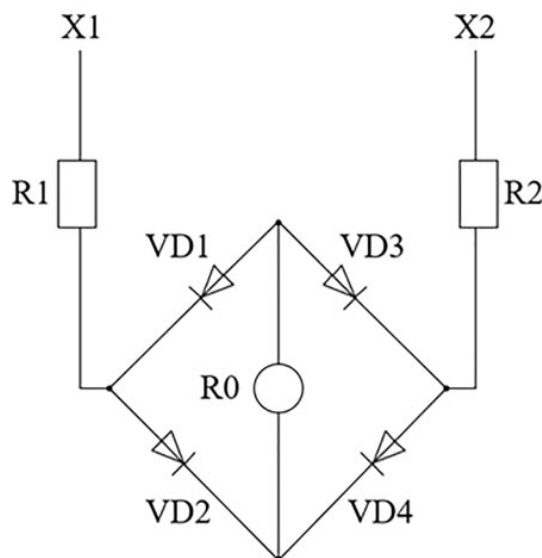


Рис. 6. Механизм электрического КИП магнитоэлектрической системы:
а – схема; б – изображение внутреннего механизма выпрямления

Fig. 6. Electrical instrumentation mechanism of a magneto electric system:
a - schematic; b - image of the internal rectification mechanism

Перед составлением математической зависимости необходимо определить, какие параметры остаются неизменными, а какие меняются под влиянием температурного воздействия. Магнитная индукция магнита изменяется, что подтверждается исследованиями, проводимыми в области материаловедения, при этом изменения индукции осуществляется в пределах 10 % в диапазоне исследуемых температур 20...80 °С. Площадь рамки катушки остается неизменной, хотя может отклоняться с учетом расширения материала при нагревании. Такие изменения можно не учитывать по причине малого значения получаемых отклонений. Количество витков катушки остается неизменным параметром всегда. Ток, протекающий по катушке, изменяется по причине изменения сопротивления выпрямительного блока, а также проводимости самой катушки. При повышении температуры общее сопротивление увеличивается для пленочных и чип-резисторов, используемых в конструкции электрических ИУ [23]. Удельный момент стрелки также изменяется, уменьшаясь при повышении температуры с учетом использования наиболее тонкой пружинки с малым значением мощности. Удельный момент уменьшается в значительной степени за счет изменения коэффициента

упругости материала пружины. С учетом данного факта меняется и уравнивающий момент, при этом угол отклонения, демонстрирующий сопоставление индикаторной стрелки с проградуированной шкалой, изменяется по причине изменения вышеописанных моментов. Именно данный угол определяет точность индикации измеряемой электрической величины.

Учитывая описанные особенности термического влияния на работу ИУ и качество измерений, а также беря во внимание зависимость изменения сопротивления при разных значениях температуры, построим математическую модель, теоретически описывающую отклонения измерений при заданных значениях температуры. Зная максимальный диапазон угла отображения и нормирующую величину, можно определить коэффициент зависимости угла от измеряемой величины γ (измеряемая величина/°), таким образом, удастся связать угол отклонения непосредственно с электрической величиной. В зависимость уравнивающего момента необходимо ввести коэффициент β , учитывающий изменение упругости пружины исследуемого КИП, уменьшающийся при повышении температуры и увеличивающийся при понижении. Коэффициент является безразмерной величиной поскольку

определяется как отношение моментов внешнего воздействия к упругости. Также для связи сопротивления с полученными зависимостями по закону Ома представим значение тока как отношение напряжения на сопротивление. Таким образом, учитывая все представленные коэффициенты и допущения, получим функциональную зависимость между отклонениями электрических измерений и температурой:

$$\gamma = \frac{G_{\text{норм}}}{\alpha_{\text{макс}}};$$

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{ур}};$$

$$BSWI = M_{\text{уд}} \alpha \beta;$$

$$\alpha = \frac{BSW}{M_{\text{уд}} \beta} I;$$

$$G = \frac{BSW U_{\text{идеал}} \gamma}{M_{\text{уд}} \beta R_0 (1 + \lambda (t - t_0))}.$$

Здесь $G_{\text{норм}}$ – нормированное значение исследуемой электрической величины; $\alpha_{\text{макс}}$ – максимальный угол между начальным и нормирующим значением шкалы циферблата КИП.

В нормальном состоянии при соблюдении всех требований внешних условий для работы аналогового стрелочного ИУ уравнивающий момент равен моменту вращения. При изменении температуры удельный момент, обусловленный конструкцией прибора, также изменяется. Равенство моментов при этом сохраняется за счет увеличения или уменьшения

угла отклонения, что является следствием причины проявления погрешностей измерений.

На рисунке 7 представлены полученные идеальные графики погрешностей при функционировании КИП в различных условиях температуры. Нормирующая величина $G_{\text{норм}} = 250$; максимальный угол $\alpha_{\text{макс}} = 90^\circ$; циферблат КИП секторный с шагом 10, соответственно, на каждый шаг выделено 3,6 градуса в идеальном случае, т. е. 1 к 0,36 градуса величины измерения; магнитная индукция $B = 1,2$ Тл (изменяется из учета динамики магнитной индукции на 10 %, в температурном диапазоне 20...80 °С для 28 °С – 1,2 Тл, для 40 °С – 1,224 Тл, для 50 °С – 1,244 Тл); сопротивление $R = 0,63$ МОм с учетом номинальных значений используемых компонентов, а также схемы соединения; площадь катушки $S = 62$ мм²; количество витков $W = 5000$ тонкой медной проволоки примерно 0,05...0,1 мм; ТКС $\lambda = 0,0005$ К⁻¹; удельный момент принят равным 1,78 Н · мм; коэффициент изменения момента за счет упругости стрелки $\beta = 0,926$ (изменяется из учета динамики упругости: для 28 °С – 0,926 Тл, для 40 °С – 0,916 Тл, для 50 °С – 0,89 Тл). Изменение данного параметра напрямую зависит от материала пружины и воздействия температуры. Погрешности электрических измерений принимаются как в положительную, так и отрицательную область. Примем отклонения, полученные в результате моделирования согласно данному условию.

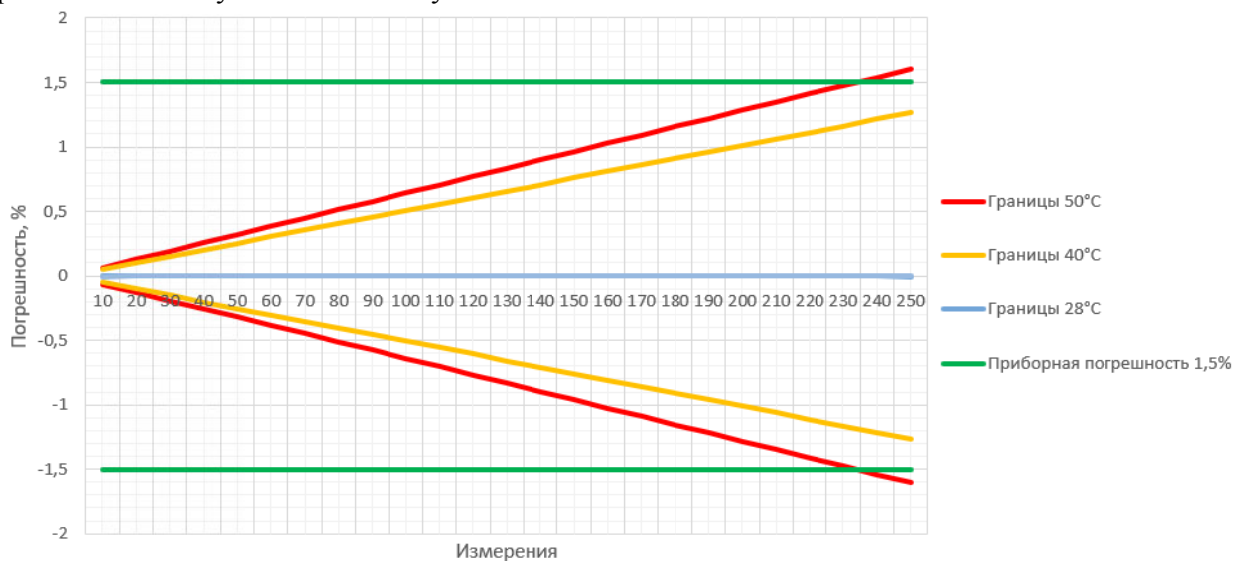


Рис. 7. График идеальных отклонений построенной математической модели

Fig. 7. Graph of ideal deviations of the constructed mathematical model

Проводя анализ полученного графика, можно отметить, что при рабочем температурном диапазоне 28 °С, установленном паспортом на КИП, в идеальном случае погрешности не проявляются. При температуре окружающей среды 40 °С погрешности увеличиваются, приближаясь к граничному значению паспортной точности, но не превышают ее. В случае работы при температуре +50 °С можно заменить превышение погрешности в области нормирующей величины.

Для оценки достоверности результатов сформированной математической модели произведем расчеты и сравним результаты полученных выборок через оценку гипотезы о равенстве средних значений. Данный метод выбран из учета объема выборки значений до

30 единиц, мощности критерия для оценки сравнения двух средних, простоты интерпретации и вычислений. При объеме значений до 30 для справедливой оценки предлагается установить закон распределения исследуемых значений: согласно исследованиям автора отклонения электрических измерений подчиняются данному закону [24].

Проведем вычисления выборочного среднего и дисперсии для экспериментальных и смоделированных значений, а также произведем оценку сопоставления выборок по таблице критических точек распределения. Воспользуемся экспериментальными и смоделированными данными, представленными в таблице 1. Полученные результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 1. Экспериментальные и смоделированные результаты измерений под действием температуры

Table 1. Experimental and simulated results of measurements under the influence of temperature

№	Эталонные значения	Экспериментальные значения			Смоделированные значения		
		$t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	10	10,841	11,049	10,852	10,00027	9,873553	9,839655
2	20	21,291	21,037	20,618	20,00054	19,74710	19,67931
3	30	31,175	31,289	31,051	30,00082	29,62066	29,51896
4	40	41,21	41,525	41,093	40,00109	39,49421	39,35862
5	50	51,143	51,426	50,891	50,00136	49,36776	49,19827
6	60	61,442	61,349	60,427	60,00164	59,24132	59,03793
7	70	71,262	71,585	70,41	70,00191	69,11487	68,87758
8	80	81,345	81,283	80,051	80,00218	78,98843	78,71724
9	90	91,303	91,75	90,131	90,00246	88,86198	88,55689
10	100	101,54	101,44	101,18	100,0027	98,73553	98,39655
11	110	111,53	111,71	109,8	110,0030	108,6090	108,2362
12	120	121,2	121,78	119,79	120,0032	118,4826	118,0758
13	130	131,53	130,87	129,49	130,0035	128,3561	127,9155
14	140	140,83	141,53	139,7	140,0038	138,2297	137,7551
15	150	151,17	151,39	149,29	150,0041	148,1033	147,5948
16	160	160,97	160,05	159,24	160,0043	157,9768	157,4344
17	170	170,85	170,46	168,84	170,0046	167,8504	167,2741
18	180	180,1	180,89	178,38	180,0049	177,7239	177,1137
19	190	190,25	190,53	188,64	190,0051	187,5975	186,9534
20	200	200,62	200,64	198,29	200,0054	197,4710	196,7931
21	210	210,08	209,07	206,25	210,0057	207,3446	206,6327
22	220	218,83	217,93	216,33	220,0060	217,2181	216,4724
23	230	228,35	227,6	225,12	230,0062	227,0917	226,3120
24	240	238,24	237,6	235,09	240,0065	236,9652	236,1517
25	250	247,7	246,69	244,51	250,0068	246,8388	245,9913

Таблица 2. Параметры выборочного среднего и дисперсии

Table 2. Parameters of sample mean and variance

Параметры	Экспериментальные значения			Смоделированные значения		
	$t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Выборочное среднее	130,592	130,4989	129,018	130,0035	128,35619	127,91552
Дисперсия	5079,53	5040,792	4946,113	5200,2843	5069,32736	5034,5787

Результаты сравнения для $t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляют 0,029023, для $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,106551, для $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,055205, что согласно значению достоверности 99 % равной 11,52 по таблице критических точек полностью подтверждает достоверность равенства средних значений. Таким образом, учитывая сравнение наклона средних кривых для отклонений экспериментальных и смоделированных данных, а также результаты оценки средних значений, можно говорить о достоверности работы сформированной модели кратковременного воздействия температуры. Конечно, неоспоримым допущением модели является то, что данные значения в большей степени определяются как идеальное влияние температуры без учета сложно прогнозируемых случайных и вероятностных случаев, но для оценки степени термического воздействия с точки зрения качества данный инструмент подходит в достаточной степени. Также возможно учитывать изначальную погрешность отклонения нулевого значения, в остальных случаях необходимо учитывать особенность деформации КИП, полученную в результате продолжительной эксплуатации.

Полученные графики показывают, насколько увеличивается погрешность электрических измерений при повышении температуры окружающей среды. Одну из ключевых ролей играют параметры, принимаемые при расчетах модели и изменяемые с учетом температуры. Результаты модели показывают, насколько сильно могут изменяться погрешности под действием различной температуры. Граничные температурные рамки являются допустимыми для функционирования электрических КИП. Результаты моделирования показывают, что такой режим работы оказывает значительное воздействие на конструкцию ИУ, что является причиной проявления отклонений, превышающих паспортную точность. При этом стоит отметить, что продолжительный функционал при определенном температурном режиме может изменить изначальную механическую и электрическую настройку КИП. Изменение внутреннего давления в приборе при повышении температуры может составлять более 1 %, что также скажется на механической работе прибора [25]. Данное допущение учтено в представленной модели и выражено в каче-

стве коэффициента, описывающего изменение упругости пружины.

Использование сформированной математической модели для повышения качества оценки электрических КИП и фиксации данных

Полученная математическая модель описывает, насколько искажаются результаты измерений под действием определенной температуры. При незначительных увеличениях температурного режима отклонения будут незначительными и лежащими в области допустимых значений паспортной точности. Но чем ближе к граничному значению, тем сильнее рабочая среда оказывает воздействие на работу прибора. Учитывая конструктивное проектирование на определенный температурный режим, можно сказать, что на продолжительную качественную работу в таких условиях КИП не ориентированы, что наглядно демонстрирует и эксперимент, и математическое моделирование. Более длительное время работы при граничных и близких к ним температурах может навсегда изменить точность прибора, снизить его техническое качество.

Сформированная математическая модель ориентирована на понимание оценки и прогнозирование изменения точности электрического прибора. Результаты данной модели могут быть полезны производителям электрических КИП для подробного и в большей степени информативного описания степени влияния термического воздействия на точность ИУ при разных уровнях температурной величины. Данное пояснение, как и сама модель, также будут полезны для проектировщиков производственных объектов, участков или отдельных электроаппаратов, где используется и планируются к применению электрические КИП аналогово-стрелочной системы. Модель имеет перспективы применения в области поверки и аттестации электрических ИУ, а также результаты расчетов найдут применение в квалиметрических моделях оценки качества приборов.

Ценностью для производителей КИП является объективная оценка и определение допустимых температурных значений эксплуатации прибора на этапе проектирования прибора. Результаты модели позволят дополнить описание температурных режимов наиболее точными параметрами при работе в различ-

ных диапазонах температуры. Для проектировщиков производств, зданий, объектов и устройств представленная модель и ее результаты позволят намного точнее подбирать измерительное оборудование, что скажется на замедлении динамики снижения точности приборов и ухудшении качества результатов измерений. В рамках аттестации представленную модель можно использовать для корректировки результатов измерений в случае невозможности поддержания нормальных условий для поверки КИП, а также по результатам оценки возможно установить степень точности и качества функционирования прибора в ранее эксплуатируемых внешних условиях температуры, необходимость работы КИП в определенных температурных режимах, скорректировать диапазон межповерочного интервала для устройства.

Применение модели в таких областях нацелено на управление рисками снижения точности ИУ под воздействием внешних условий температуры, что обеспечит выполнение работы прибора в заявленных рамках допустимых погрешностей.

Выводы

1. Исследование подтверждает факт работы электрических КИП в условиях критического значения температуры окружающей среды. В качестве подтверждения приведен анализ температуры в локации расположения энергетического объекта Ставропольской ГРЭС в поселке Солнечнодольск.

2. Проведен краткий анализ электрических КИП аналогово-стрелочной и цифровой систем, на его основе выделены ключевые общие элементы, свойства которых зависят от рабочей температуры окружающей среды. Данным элементом является сопротивление, которое характеризуется температурным коэффициентом. Как показывает практика, на многих производствах и предприятиях наиболее часто используются стрелочные электрические ИУ по причине изначального проектирования промышленных объектов без системы питания измерителей.

3. Проведено экспериментальное исследование влияния различной температуры на стрелочный аналоговый КИП. В результате оценки итоговой точности прибора виден отчетливый рост средней приведенной погреш-

ности: 0,45699 % – при +28 °С; 0,55509 % – при +40 °С; 0,6071 % – при +50 °С. Температурные рамки выбраны из соображения рабочей величины +28 °С, близкой к граничному по паспорту прибора значению; +40 °С – для оценки динамики изменения отклонений; +50 °С – по причине соответствия крайнему значению верхней температурной границы. Средняя линия приведенных отклонений с ростом температуры показывает увеличение угла наклона.

4. Разработана математическая модель, отражающая зависимость между погрешностями электрических измерений и температуры рабочей среды. В модели учтена особенность конструкции электрических КИП аналогово-стрелочной системы, дополнительно введен коэффициент, отражающий изменение упругости пружины в зависимости от температуры. Представленные результаты моделирования полностью соответствуют экспериментальной форме средней линии погрешностей, что говорит о корректности выведенной зависимости.

5. Практическая значимость работы заключается в возможности оценки настоящего состояния качества электрического КИП с учетом условий эксплуатации даже в идеальных условиях проведения поверки. На основе моделирования возможно определить наиболее оптимальный уровень рабочей температуры внешней окружающей среды для работы ИУ с сохранением допустимого или необходимого уровня качества измерений электрических величин.

6. Достоинством представленной модели является описание взаимодействия угла отклонения стрелки и температуры через физическое взаимодействие и описание процесса отображения измеряемой величины.

7. Сформированная модель может быть использована производителями ИУ, проектировщиками объектов электроэнергетики, организациями, осуществляющими мероприятия поверки и аттестации электрических КИП, как инструмент оценки влияния температуры на работу КИП. Результаты моделирования могут стать объективной оценкой или причиной в рамках внесения изменений в условия эксплуатации или сокращения поверочного интервала.

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. Бородин Е. А., Семенова Л. Л. Зависимость сопротивления от температуры различных материалов и определение их температурного коэффициента // Вестник кибернетики. 2019. № 1. С. 55–59.
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. Watson J., Castro G. (2012) High-Temperature Electronics Pose Design and Reliability Challenges. *Analog Dialogue*, no. 46.
6. Markov N.N., Kainer G.B., Satserdotov P.A. (1963) Effect of temperature on errors of instruments in the course of measurements. *Measurement Techniques*, vol. 6, pp. 898-903. DOI: 10.1007/BF00990868
7. Исследование влияния температуры на магнитные характеристики ферритов из марганцево-цинкового сплава / М. Л. Кахняж, Я. Л. Салах, Р. Ю. Шевчик, А. В. Беньковски, И. В. Коробийчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. С. 17–21.
8. Черкасова О. Я., Черкасова С. А. Термостабильность постоянных магнитов как основной фактор снятия обратимых изменений для обеспечения надежности изделия // Вестник науки и образования. 2016. № 12. С. 6–8.
9. 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
10. Рузиев Ш. Восстановление упругости пружин методом термомеханической обработки // Общество и машиностроение. 2020. № 1. DOI: 10.47689/2181-1415-vol1-iss1/s-pp1-7
11. 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
12. Ezzat M.A., Othman M.I., El-Karamany A.S. (2011) The dependence of the modulus of elasticity on the reference tempera generalized the rmoelasti city. *Journal of Thermal Stresses*, no. 12, pp. 1159-1176. DOI: 10.1080/014957301753251737
13. Экспериментальное определение конструктивно-технологических параметров стрелочных электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы / А. А. Новиков, В. А. Тихоненков, О. Д. Новикова, И. А. Новикова // Вестник ульяновского государственного технического университета. 2004. № 2. С. 44–46.
14. Крюков М. Высокостабильные тонкопленочные чип-резисторы фирмы Physcomp // Компоненты и технологии. 2003. № 4. С. 16–18.
15. Донец С. А., Чикова Ю. Н., Шамарина Н. И. Оптимизация параметров пленочных резисторов, формируемых в диэлектрических структурах гибридных многослойных печатных плат // Вестник воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 5. С. 228–231.
16. Литвишников Ю. Н. О физическом смысле параметров уравнения Аррениуса // *Kimya Problemləri*. 2019. С. 456–464. DOI: 10.32737/2221-8688-2019-3-456-464
17. Теоретическая оценка влияния автоматизации на производственный процесс поверки контрольно-измерительных приборов / А. П. Бобрышов, С. В. Солёный, М. В. Сержантова, В. П. Кузьменко, М. Э. Создательева, Р. В. Рудаков // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14, № 6. С. 571–577.
18. Добрышкин А. Ю., Сысоев О. Е., Сысоев Е. О. Экспериментальное исследование влияния воздействия температурного режима на модуль Юнга // Труды МАИ. 2020. № 115. DOI: 10.17580/tsm.2025.03.09
19. Bobryshov A. (2024) Analysis of the influence of mathematical algorithms of measurement processing of electrical control and measuring devices on the results of verification. *Bulletin of the Unesco chair “Distance education in engineering” of the SUAI*, no. 9, pp. 45-49.
20. Кочетков А. В., Федотов П. В. Уравнение состояния газа и модель идеального газа // Вестник евразийской науки. 2017. Т. 9, № 3. С. 57.

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 that determine the quality of electrical control and measuring instruments]. *Innovative instrumentation*, vol. 3, no. 4, pp. 5-13 (in Russ.).
3. Borodina E.A., Semenova L.L. (2019) [Dependence of resistance on temperature of various materials and determination of their temperature coefficient]. *Bulletin of Cybernetics*, 2019, no. 1, pp. 55-59 (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. Watson J., Castro G. (2012) High-Temperature Electronics Pose Design and Reliability Challenges. *Analog Dialogue*, no. 46.

6. Markov N.N., Kainer G.B., Satserdotov P.A. (1963) Effect of temperature on errors of instruments in the course of measurements. *Measurement Techniques*, vol. 6, pp. 898-903. DOI: 10.1007/BF00990868

7. Kahnayazh M.L., Salakh Ya.L., Shevchik R.Yu., Benkovski A.V., Korobychuk I.V. (2015) [Study of the effect of temperature on the magnetic characteristics of manganese-zinc alloy ferrites]. *East European Journal of Advanced Technologies*, pp. 17-21 (in Russ.).

8. Cherkasova O.Ya., Cherkasova S.A. (2016) [Thermal stability of permanent magnets as the main factor in removing reversible changes to ensure product reliability]. *Bulletin of Science and Education*, no. 12, pp. 6-8 (in Russ.).

9. 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

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

11. 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

12. Ezzat M.A., Othman M.I., El-Karamany A.S. (2011) The dependence of the modulus of elasticity on the reference tempera generalized the rmoelasti city. *Journal of Thermal Stresses*, no. 12, pp. 1159-1176. DOI: 10.1080/014957301753251737

13. Novikov A.A., Tikhonenkov V.A., Novikova O.D., Novikova I.A. (2004) [Experimental determination

of design and technological parameters of pointer electrical measuring instruments of a magneto electric system]. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*, no. 2, pp. 44-46 (in Russ.).

14. Kryukov M. (2003) [Highly stable thin-film chip resistors from phycomp]. *Components and technologies*, no. 4, pp. 16-18 (in Russ.).

15. Donetsk S.A., Chikova Yu.N., Shamarina N.I. (2009) [Optimization of parameters of film resistors formed in dielectric structures of hybrid multilayer printed circuit boards]. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, vol. 5, no. 5, pp. 228-231 (in Russ.).

16. 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.).

17. Bobryshov A.P., Solenyi S.V., Serzhantova M.V., Kuzmenko V.P., Sozdateleva M.E., Rudakov R.V. (2023) [Theoretical assessment of the impact of automation on the production process of verification of control and measuring instruments]. *Nuclear Physics and Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 571-577 (in Russ.).

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

19. Bobryshov A. (2024) Analysis of the influence of mathematical algorithms of measurement processing of electrical control and measuring devices on the results of verification. *Bulletin of the Unesco chair "Distance education in engineering" of the SUAI*, no. 9, pp. 45-49.

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

Mathematical Model of Dependence of Electrical Measuring Device Accuracy on Temperature Effects: Experimental Research and Modeling

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

Product or service quality assessment is a complex task in terms of data collection and processing. For electrical test and measurement devices, one of the key parameters affecting the operating quality is the influence of external conditions, one of which is the ambient temperature. Since measurement device is a complex structural product, the effect of temperature has to be evaluated comprehensively on the entire electrical data display mechanism. The key objective of this study is to construct a mathematical model that characterizes the short-term effects of external temperature exposure on the overall design, operation, and quality of an electrical instrumentation device. The model presented in the study considers the change in the internal resistances of the instrument, the change in the magnetic induction and the characteristic rebuilding dynamics of the return mechanism spring of the arrow-analog measurement devices. According to the model results, the diagrams of temperature effect on the errors of electrical measurements were presented. It was determined that when operating in the boundary modes, values close to the normalizing one exceed the device allowable error. The presented model is proposed to be used as a tool for evaluation, tracking and correction of electrical instrumentation deviations, as well as for more precise determination of the measurement device quality level subjected to temperature effects. The results of the model have an objective quantitative assessment for qualification and adjustment of the verification interval. According to measurements of temperature modes and basic parameters of the investigated electrical instrumentation, it is possible to perform modeling and evaluate further temperature effect on the final accuracy of the device.

Keywords: electrical instrumentation, accuracy and deviations of measurements, temperature impact, mathematical model.

Получено 10.02.2025

Образец цитирования

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

For Citation

Bobryshov A.P. (2025) [Mathematical Model of Dependence of Electrical Measuring Device Accuracy on Temperature Effects: Experimental Research 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.)