

В.В. МИРОШНИКОВ, д-р. техн. наук, проф., ВНУ им. Даля, заведующий кафедрой "Приборы" (г. Луганск)

А.И. КОТУЗА, начальник отдела НПЦ "Техдигаз" ДК "Укртрансгаз" (г. Харьков)

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

У цій роботі розглядаються основні методи та засоби для визначення температури виробів та середовищ, які використовуються в промисловості. Наведено переваги та недоліки методів та засобів контролю температури. Вказується на доцільність більш детального дослідження електромагнітних методів контролю температури за допомогою параметричного перетворювача.

The work is devoted to the main methods and means of product and medium temperature determination which are used in industry. The advantages and the disadvantages of the methods and means are pointed. The necessity of more detailed analysis of the electromagnetic temperature control methods by means of parametric transducer is proved.

Введение

В статье кратко освещены основные контактные (термоэлектрический, терморезистивный, термомагнитный, термочастотный, термозумовой) и бесконтактные (пирометрические, электромагнитные) методы и средства для определения температуры изделий и сред, которые используются в промышленности; указаны их достоинства и недостатки. В итоге обзора приоритетными для дальнейшего исследования выбраны электромагнитные методы контроля температуры параметрическим преобразователем.

Контактные методы и средства измерения температуры применяются для измерения температур, начиная от значений близких к абсолютному нулю и до 1500 °С. При использовании термопреобразователей из тугоплавких материалов можно повысить верхний предел измерений до 2500 – 3000 °С. Из контактных наиболее широкое применение получили термоэлектрический и терморезистивный методы, к достоинствам которых относятся их простота, надёжность, низкая стоимость и возможность получения достаточно высокой точности измерений. Кроме того на их основе можно легко создать многоканальные измерительные системы для непрерывного измерения параметров температурного поля сложных объектов, в том числе при высоких давлениях и в труднодоступных местах. Основные характеристики промышленных терморезисторов и термопар, а также измерительные цепи термометров сопротивления и термоэлектрических термометров рассмотрены в работе [1].

Терморезистивные термометры по используемому материалу можно

разделить на металлические и полупроводниковые [1, 2]. Принцип действия их основан на измерении электрического сопротивления при варьировании температуры.

Металлические терморезисторы имеют достаточно стабильные зависимости электрического сопротивления от температуры и обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), колеблющимся в интервале температур $0 \div 100$ °С от $3,5 \cdot 10^{-3}$ до $6,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹. В качестве материала для термометров сопротивления используют металлы с хорошей электрической проводимостью, например, платину, никель и медь. Медь применяют для температур от -50 до 200 °С, никель от -60 до 180 °С, платину от -220 до 750 °С, а в нейтральной атмосфере и до 1000 °С [3]. В диапазоне от 0 до 650 °С сопротивление платинового терморезистора можно найти из выражения [4]

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha t + \beta t^2), \quad (1)$$

где R_0 - сопротивление при 0 °С; t - температура в градусах Цельсия; α - температурный коэффициент сопротивления; $\beta = -5,847 \cdot 10^{-7}$ К⁻².

В диапазоне от 0 до -200 °С функция преобразования имеет вид

$$R = R_0 \left[1 + \alpha t + \beta t^2 + C(t - 100)^3 \right], \quad (2)$$

где $C = -4,22 \cdot 10^{-12}$ 1/К.

Выбор металла для терморезистора определяется его химической активностью к измеряемой среде в интересующем интервале температур [4]. Сопротивление медных проводников в диапазоне от -50 до +180 °С выражается соотношением [4]

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (3)$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Никелевые датчики характеризуются высокой чувствительностью, диапазоном 250-300 °С; линейной характеристикой в интервале $0 \leq t \leq 100$ °С. Медные и никелевые термометры сопротивления выпускают из литого микропровода в стеклянной изоляции; они герметизированы, имеют высокую стабильность, мало подвержены коррозии и при малых габаритах имеют сопротивление до десятков кОм.

Сравнительно высокий ТКС имеют вольфрам $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ и молибден $\alpha = 4,57 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, однако при $t \geq 400$ °С они не применяются из-за сильного окисления и разрушения чувствительного элемента. Для низкотемпературных измерений используются некоторые фосфористые бронзы.

Достоинствами металлических терморезисторов являются: высокая стабильность ТКС, линейность зависимости сопротивления от температуры, хорошая воспроизводимость свойств, инертность к воздействиям окружающей среды, высокая точность измерений, простота и надёжность схемных реализаций, удобство в эксплуатации. Платиновые термометры позволяют измерять температуру с абсолютной погрешностью порядка 0,001 °С [5]. Погрешности возникают из-за нестабильности во времени начального сопротивления

термометра и его ТКС, изменения сопротивлений линий связи, соединяющей термометр с измерительным прибором, перегревом термометра током и др. К недостаткам относятся низкий ТКС и относительно большие габариты в сравнении с полупроводниковыми термометрами сопротивлений [1, 4, 6].

Полупроводниковые терморезисторы (ПТР) в общем случае имеют зависимость сопротивления от температуры в виде [4]

$$R = Ae^{B/T}, \quad (4)$$

где A - коэффициент, имеющий размерность сопротивления; B - размерность температуры; T - абсолютная температура.

Для каждого конкретного ПТР коэффициенты A и B , как правило, постоянны.

Из выражения (4) следует, что зависимость R от T является убывающей функцией, т.е. ТКС отрицателен.

Основные характеристик ПТР: диапазон от -100 до $+300$ °С; абсолютная погрешность: $0,01 \div 0,001$ °С; ТКС при 20 °С: $0,02 \div 0,08$; постоянная времени: $0,4 \div 115$ с; номинальное сопротивление при 20 °С: от $0,5$ до 3300 кОм; функция преобразования нелинейная (экспоненциальная). Миниатюрные ПТР измеряют температуру малых объектов с минимальными искажениями режима работы, а также температуру, изменяющуюся во времени. Специальные ПТР могут измерять температуру от -196 °С (СТ7-1) до 1000 °С (СТ12-1).

Достоинствами ПТР являются: большое удельное электрическое сопротивление и ТКС, высокая чувствительность, широкий температурный диапазон, малые погрешности, простые и надежные схемы включения преобразователей, малая инерционность, возможность работы преобразователя в агрессивных средах. К недостаткам можно отнести нелинейность температурной характеристики, значительный разброс номинального значения сопротивления R и постоянной B . Это затрудняет получение линейных шкал термометров, обеспечение взаимозаменяемости терморезисторов, а также построение многоканальных приборов.

Термоэлектрический метод. При закреплении концов двух различных проводников (или полупроводников) и нагревании места закрепления до температуры t , отличной от температуры "холодных" концов, имеющих температуру $t_0 < t$, на "холодных" концах возникает термоэдс, выражение для которой имеет вид

$$E_t = f(t) - f(t_0), \quad (5)$$

где $f(t)$ - функция температуры t ; $f(t_0)$ - функция температуры t_0 .

Термопары используют для измерения температуры изделий и сред (жидких и газообразных) в различных приборах и устройствах: амперметрах, вольтметрах, ваттметрах термоэлектрической системы, термоанемометрах, вакуумметрах и др. Градуировочные характеристики термопар основных типов приведены в [3, 4, 6]. Конструктивные решения термоэлектрических преобразователей описаны в [3, 6].

К достоинствам термопар относят: широкий диапазон измерений температур,

простота схем включения, широкие функциональные возможности, удобство эксплуатации, высокая надёжность; к недостаткам: жёсткие требования к чистоте металлов, погрешность измерений, связанная с уходом температуры "холодных" концов. Кроме того, появляются погрешности, обусловленные изменением температуры линии связи с термопарой. Методические погрешности возникают вследствие малой выходной мощности термопар, так как при подключении к её концам милливольтметров происходит отбор энергии термопары. Для уменьшения погрешностей применяются схемы автоматической коррекции ухода температуры "холодных" концов, включение последовательно с милливольтметром добавочного сопротивления из манганина или константана [1, 3, 4]. Постоянная времени термопар находится в пределах от ≤ 40 с до $\leq 3,5$ мин. [3]. Термопары позволяют измерять температуру в очень широком диапазоне: от -200 °С (медь/копель) до $+2200$ °С (вольфрам - 5 % рения /вольфрам – 20 % рения).

В основе **термомагнитного метода** лежит обратно - пропорциональная зависимость магнитной восприимчивости парамагнитных веществ или ядерной магнитной восприимчивости от температуры (закон Кюри-Вейса) [2, 3]. Чувствительными элементами в термомагнитных преобразователях являются парамагнитные соли и металлы, такие как медь или платина. Термомагнитные преобразователи используются для измерения низких температур от $0,01$ до 30 К с погрешностью от 1 до 5% . Использование для измерений магнитной восприимчивости магнитометров и градиометров со сверхпроводящим квантовым интерференционным датчиком, основанном на эффекте Джозефсона, позволило повысить чувствительность и расширить нижний предел измерения до $2-10$ мК [2]. Для измерения температуры термомагнитным методом можно также использовать зависимости различных видов магнитных проницаемостей ферромагнетиков от температуры [7]. Достоинства термомагнитного метода состоят в отсутствии систематической погрешности и высокой чувствительности.

Измерение температуры **термочастотным методом** основано на использовании зависимости от температуры частоты собственных колебаний различного рода резонаторов, скорости распространения звуковых и ультразвуковых колебаний и параметров частотно-зависимых RC или RL- цепей с терморезистором [1, 2]. Наиболее развиты резонансные термочастотные методы, основанные на применении резонансных датчиков, которые представляют собой автогенераторы или генераторы с вынужденными колебаниями, частота которых настраивается в резонанс с собственными колебаниями резонатора, изменяющихся с температурой. Для измерения температуры применяются механические (твердотельные), газовые и ядерные резонаторы. Функция преобразования термометров с резонансными преобразователями на рабочем участке характеристики в виде полинома [2]:

$$f=f_0 [1+\alpha(T-T_0)+\beta(T-T_0)^2+\gamma(T-T_0)^3], \quad (6)$$

где α , β и γ - коэффициенты, которые выбираются в зависимости от вида и

характеристик резонаторов.

У кварцевых резонаторов погрешность, возникающая за счёт нелинейности характеристики, весьма незначительна. В остальных случаях необходима линеаризация характеристик прибора с помощью дополнительных устройств с функциональными преобразователями. Микропроцессорная техника позволяет создавать точные частотные термометры с погрешностью линейности не более 10^{-5} . В термометрах с механическими резонаторами применяются струнные, камертонные, язычковые, консольные, дисковые и другие виды твердотельных резонаторов [2]. Температурно-зависимым управляемым параметром в таких резонаторах выступает жёсткость, момент инерции резонатора или температурные напряжения в резонаторе. Из твердотельных резонаторов для измерения температуры до 500-700 °С наибольшее распространение получили пьезокварцевые преобразователи, отличающиеся высокой линейностью характеристики. Пример устройства датчика цифрового термометра с механическим резонатором (камертоном), работающим в режиме вынужденных колебаний, приведен в работе [2]. Чувствительность механических резонаторов к температуре достаточно высока: для пьезокварцевых термометров в пределах от 20 до 2850 Гц/К (в рабочем диапазоне от -196 до +500 °С), достигнут порог чувствительности кварцевого термометра 10^{-6} - 10^{-9} К. Недостатком кварцевых термометров является большое время установления показаний (десятки секунд) за счёт плохой теплопроводности между защитным корпусом датчика и чувствительным элементом; нестабильность градуировочной характеристики - порядка $\pm 2\%$.

Измерения температуры методом ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) основаны на зависимости от температуры частоты прецессии атомных ядер, обладающих электрическим квадрупольным моментом. Диапазон измеряемых температур составляет от 10 до 600 К. При этом в качестве термометрического вещества используется соль $KCrO_3$. При температуре 870 °С используется ЯКР ядер Re в соли $NaReO_4$. Недостатками таких термометров являются сложность технической реализации в заводских условиях и влияние на результаты контроля давления. Их достоинство – это высокая точность, позволяющая использовать такие термометры для создания вторичных эталонов температуры, в частности, для воспроизведения практической температурной шкалы [2].

Измерение температуры **термошумовым методом** [2] базируется на уравнении Найквиста, устанавливающего зависимость напряжения тепловых шумов, возникающих на резисторе, от термодинамической температуры

$$U_{ш}^2 = 4 k T R \Delta f, \quad (7)$$

где $U_{ш}^2$ – среднее квадратичное значение шумового напряжения; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; Δf – полоса частот измерения.

Термошумовой метод используется для измерения температуры в диапазоне от 0,001 до 2500 К. В качестве измерительных преобразователей применяются

резисторы из платины, манганина, константана, нихрома, вольфрама, графита, а также ёмкостные и индуктивные преобразователи, представляющие собой резонансный колебательный контур. Источником теплового шума в двух последних преобразователях служит сопротивление среды, температура которой измеряется, например, температура ионизированного газа или пламени. Недостатки термошумового метода заключаются в низком уровне полезного сигнала, составляющего доли микровольт. Точность термошумового метода ограничивают собственные шумы измерительного канала, помехи в линии связи, изменение коэффициента усиления входного усилителя. Различные способы реализации термошумового метода отличаются, как правило, путями коррекции погрешностей от указанных факторов. Широкое распространение получили термошумовые термометры, в основу которых положено сравнение средних квадратичных значений напряжений шумов двух резисторов, находящихся при разных температурах, одна из которых известна.

Бесконтактные методы измерения температуры

Теория **пирометрических методов** основана на законах, устанавливающих связь между излучением абсолютно черного тела (АЧТ) и его температурой. В зависимости от входной величины пирометры подразделяются на пирометры полного (радиационные пирометры) и частичного излучения (яркостные пирометры), пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры). Пирометры охватывают широкий диапазон температур от 173 до 6000 К.

Радиационные пирометры имеют наиболее широкий температурный диапазон измерения.

Оптические (спектральные) пирометры чувствительны только в узком интервале длин волн. Это ограничение достигается установкой специального селективного фильтра в направлении хода лучей. Излучение измеряемого объекта определяется непосредственно приёмником излучения. Наиболее распространены пирометры с исчезающей нитью накаливания, отличающиеся простотой применения и высокой точностью измерений. Максимальная температура накала нити ограничена (для вольфрама – не более 1500 °С). Достоинствами пирометров с исчезающей нитью является лёгкость и удобство в обращении с приборами. Недостатком, ограничивающим применение этих приборов, является субъективность получаемого результата. Этому недостатка лишены оптические пирометры с объективным приёмником излучения, например, с чувствительным селективным фотоэлектрическим элементом [2]. Нижний предел температур для субъективных методов измерений составляет 650 °С, что обуславливается спектром видимого света; для приборов с объективным измерением он составляет 200 °С. Верхний предел измеряемой температуры практически не ограничивается. Как правило, измеряют температуру до 2500 °С, и даже до 10000 °С. Промышленные приборы имеют точность определения мощности около $\pm 1\%$ верхнего значения диапазона измерений; прецизионные приборы -

около $\pm 0,2 \div \pm 0,3$ % [8].

Пирометры полного излучения основаны на зависимости от температуры интегральной мощности M_T излучения АЧТ во всем диапазоне длин волн, определяемой законом Стефана-Больцмана

$$M_T = \sigma T, \quad (8)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴).

Для реального тела эта зависимость определяется выражением

$$M_T = \varepsilon \sigma T^4, \quad (9)$$

где ε – коэффициент излучательной способности поверхности тела, зависящий от его материала и температуры.

Радиационной температурой объекта называется такая температура АЧТ, при которой его полная мощность излучения равна полной мощности излучения рассматриваемого объекта при температуре T . Связь между T_p и T находится из равенства

$$T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon}. \quad (10)$$

Пирометры полного излучения используются в температурном диапазоне от -50 до 3500 °С. В [2] приведены принципиальные схемы пирометров полного излучения с термоэлектрическим приёмником в виде термобатарей.

Рабочий температурный диапазон пирометров частичного излучения составляет от -100 до 6000 °С. Основная погрешность измерения для различных типов пирометров лежит в диапазоне $0,25 \div 2,5$ %; быстродействие $0,001 \div 2,5$ с.

Яркостные пирометры измеряют не действительную температуру тела T , а так называемую яркостную температуру $T_{я}$. Соотношения между T и $T_{я}$ определяются выражением [2]

$$(1/T) = (1/T_{я}) + \lambda \ln \varepsilon_{\lambda} / C_2, \quad (11)$$

где ε_{λ} – коэффициент теплового излучения для длины волны λ ; C_2 – вторая постоянная излучения; $C_2 = 0,01438786$ м·К.

Тепловидение и термография. Приборы для наблюдения и исследования объектов по их тепловому излучению называются тепловизорами, термографами или телевизорными микроскопами. Телевизионные приёмные трубки – видиконы с фоторезистивным слоем из пленки оксида свинца чувствительны к излучению до 2 мкм. Телекамеры с видиконами могут определять температурное поле при $T \geq 250$ °С. Для развития термографии и тепловидения объектов с более низкими температурами созданы чувствительные приёмники инфракрасного излучения, спектральная чувствительность которых простирается далеко в инфракрасную область спектра. Применение в качестве приёмников излучения пирозлектрических элементов [4] даёт возможность получать видимое изображение температурного поля объектов с температурой от -20 до 2000 °С. В серийно выпускаемых тепловизорах и термографах применяются дискретные приёмники инфракрасного излучения и оптико-механические системы развёртки

изображения при помощи вращающихся или колеблющихся зеркал или призм [2]. Порог чувствительности тепловизора – минимально определяемая разность температур ΔT_{\min} на поверхности АЧТ ($\varepsilon = 1$) с $T = 25$ °С, при которой отношения сигнала к собственным шумам тепловизора равно 1. У серийно выпускаемых тепловизоров $\Delta T_{\min} = 0,1...0,3$ °С. Тепловидение и термография используются при геологических и климатологических исследованиях земной поверхности, в медицинской диагностике, в строительстве для проверки теплоизоляции зданий, в энергетике для обнаружения мест перегрева в электрических цепях и энергетическом оборудовании, а также для измерения механических напряжений и деформаций методом термоупругости.

Электромагнитные методы и преобразователи. Основу вихретокового контроля составляет закон электромагнитной индукции, в соответствии с которым интенсивность и распределение возбуждаемых в объекте контроля вихревых токов зависят от его геометрических и электромагнитных параметров. Переменный ток, действующий в катушках вихретоковых преобразователей (ВТП), создаёт электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. Для определения зависимости выходных сигналов от параметров контролируемых изделий необходимо решить краевые задачи электродинамики по расчёту электрических и магнитных полей для различных ВТП и контролируемых изделий [8]. Результаты решения этих задач составляют теоретические основы разработки методов и средств контроля различных геометрических и электрофизических параметров изделий различной формы. Для упрощения решений задач подобного рода введен ряд общепринятых допущений [9], с учётом которых требуется решить уравнения Максвелла с граничными условиями для принятых расчётных моделей преобразователей и объектов контроля, определить векторные потенциалы и вносимые параметры различных типов преобразователей. Теория вихретокового контроля достаточно хорошо разработана и освещена во многих трудах, например в [8, 9].

Преимуществом ВТП является то, что в их выходных сигналах содержится многопараметровая информация об электрических, магнитных, геометрических и связанных с ними других физико-механических величин, в том числе и с температурой материала изделия. Благодаря таким важным достоинствам как бесконтактность, слабая зависимость результатов контроля от физического состояния окружающей среды, получение первичной информации в виде электрических сигналов, большая производительность устройств, простота конструкций и высокая надёжность, высокая чувствительность, сравнительно малые погрешности измерений они открывают широкие возможности для автоматизации контроля температуры.

Следует отметить, что в настоящее время электромагнитные методы и устройства недостаточно широко используются для измерения температуры изделий и сред. Основной причиной, ограничивающей применение таких методов и средств измерений, являются довольно сложные зависимости

сигналов преобразователей от температуры. В основном эти методы и устройства применяются для оценки качества и определения оптимальных режимов термической обработки в технологических процессах [10]. В работе [11] рассмотрен трансформаторный электромагнитный преобразователь температуры, реализующий амплитудный, фазовый и переменного-частотный вихревые методы. В качестве информативных параметров в этой работе используются амплитуда, фаза и частота суммарной эдс преобразователя. Недостатком используемой термометрической установки является необходимость компенсации влияния паразитного магнитного потока, обусловленного наличием воздушного зазора между измерительной обмоткой и изделием, что усложняет настройку и работу схемы и понижает точность измерения температуры.

Выводы

Таким образом можно сделать заключение, что к достоинствам контактных методов измерений и соответствующих средств следует отнести их широкий температурный диапазон, простоту, надежность, низкую стоимость, работу в любых средах и возможность получения малых погрешностей измерений температуры чувствительного элемента. Главной особенностью таких методов и средств является то, что они преобразуют в сигнал измерительную информацию термометрического свойства термопреобразователя, а не объекта исследования, т.е. измеряют температуру, которая отлична от температуры объекта. Для контактных методов также характерны погрешности, обусловленные взаимодействием объекта и средства измерения, недостаточным тепловым контактом между преобразователем и объектом исследования, теплообменным излучением между термопреобразователем и окружающими его телами, паразитным теплообменом между объектом и окружающей средой за счёт теплопроводности термопреобразователя, собственным потреблением тепловой энергии термопреобразователем при помещении его в среду измерения и др.

Бесконтактные преобразователи (оптические пирометры) обладают наряду с достоинствами контактных устройств, еще и возможностью измерения температуры вдали от нагреваемого или охлаждаемого объекта исследований.

Оптические пирометры, хотя и имеют основное достоинство, бесконтактность контроля температуры, однако обладают рядом недостатков, главными из которых является сложность конструкции, зависимость показаний устройств от расстояния до объекта, от степени загрязненности среды, от состояния поверхности исследуемого объекта (слой окислов, шлаков и др.). Такие преобразователи могут функционировать в том случае, когда объект или его часть должны быть в пределах видимости и др. Но самым главным недостатком и контактных, и бесконтактных методов и средств измерений является то, что такие устройства позволяют определять температуру только на поверхности изделия; они не дают возможности измерять среднюю по сечению температуру изделия и в отдельных его слоях. Таким образом, с помощью рассмотренных выше (известных) термопреобразователей нельзя определить степень прогрева изделия и

последующего распределения температуры в объекте при различных термических обработках (отжигах, закалках и др.). Данная задача решается бесконтактным измерением температуры изделий и сред с помощью электромагнитных (вихретоковых) методов и преобразователей. Однако применительно к измерению температуры изделий и сред такие методы и преобразователи недостаточно были изучены в существующей литературе. Тем не менее, запросы промышленности и научных учреждений настоятельно требуют разработки новых и совершенствования старых методов и средств для термометрии с улучшенными характеристиками и широкими функциональными возможностями, т.е. определение температуры не только на поверхности, но и внутри изделия, бесконтактность измерений, простота функций преобразования и схемных реализаций, высокая надежность устройств, чувствительность к температуре и точность измерений, возможность легкой автоматизации процесса контроля температуры.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование электромагнитных методов и реализующих их схем на основе параметрического преобразователя для бесконтактного определения температуры на поверхности и усредненной по сечению цилиндрических проводящих изделий, а также для контроля температуры жидких и газообразных сред.

Список литературы: 1. *Левшина Е.С., Новицкий П.В.* Электрические измерения неэлектрических величин. Измерительные преобразователи: Учеб. пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 320 с. 2. *Снектор С.А.* Электрические измерения физических величин. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 320 с. 3. Измерения в промышленности. Справ. изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990. - 92 с, 384 с, 344 с. 4. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. В.П. Новицкого. - Л.: Энергия, 1975. - 576 с. 5. *Лях В.И.* Повышение мощности и расширение пределов измерения термометров сопротивления // Приборы и системы управления, 1971. - №9. - С.23-25. 6. *Полищук Е.С.* Измерительные преобразователи. Киев: Вища школа, 1981. - 296 с. 7. Испытание магнитных материалов и систем / Под ред. А.Я. Шихина. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 376 с. 8. *Д.Я. Свет.* Радиационный метод определения истинной температуры, излучательной способности веществ и Реализация Термодинамической Шкалы без применения черного тела». Доклады Российской Академии Наук, 1999, т. 367, № 6. 8. *Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е.* Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 262 с. 9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред В.В.Клюева. - М.: Машиностроение, 1995. - 488 с. 10. *Горкунов Э.С., Коган Л.Х., Морозова В.М., Барз Э.М.* Вихретоковый контроль качества отпуска "тонколистовых" изделий из углеродистых сталей при колебаниях содержания углерода // Дефектоскопия - 1993. - №3. - С.62-64. 11. *Себко В.В., Горкунов Б.М.* Вихретоковые методы измерения температуры изделий и сред // Труды Международной научно-технической конференции "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Ч.3. - Харьков-Мишкольц (Венгрия)- Магдебург (Германия). - 1997. - С.174-176.

Поступила в редколлегию 05.06.08

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ОРУЖИЯ ЛЕГКОБРОНИРОВАННОЙ МАШИНЫ

Розроблено метод багатокритеріального синтезу робастного керування озброєнням легко броньованої машини з урахуванням пружних елементів. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

The method of multicriterion robust control synthesis by the armoured fighting vehicle arming control system with elastic elements is developed. The example of dynamic characteristics for such system is given.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Легкобронированные машины производства Украины и России оборудованы системами наведения вооружения и предназначены для стрельбы по воздушным и наземным целям при остановке машины [1]. Для ведения прицельного огня с ходу необходимо оборудовать легкобронированные машины системами наведения и стабилизации вооружения по танковому принципу [2-3]. Применение в системах наведения и стабилизации бортовой ЭВМ позволяет реализовать более сложные законы управления, чем традиционные регуляторы с обратными связями по углу и угловой скорости объекта управления.

К системам наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин предъявляются достаточно жесткие требования по показателям качества работы в различных режимах. Приведем часть таких требований предъявляемых к системе наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины. Время отработки заданного угла рассогласования - $t_{рег}$. Время разгона до номинальной скорости и время торможения до полного останова - $t_{раз}$. Ошибка отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты $\varepsilon_{гар}$. Ошибка стабилизации при движении по нормализованной трассе со случайным изменением профиля с заданной скоростью $\varepsilon_{сл}$. Максимальная скорость наведения ω_{max} . Минимальная скорость наведения ω_{min} . Неплавность наведения при минимальной скорости $\Delta\omega_{min}$. Естественно, что при этом должны быть учтены ограничения по напряжению и току якорной цепи приводного двигателя, а также по скорости вращения приводного двигателя.

Анализ последних достижений и публикаций. В последнее время