

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТОДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕРА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ф. Н. Бузылев, С. Н. Щербакова, Е. В. Грибков

ФЕДОР НИКОЛАЕВИЧ БУЗЫЛЕВ – к.т.н., доцент РТУ МИРЭА. E-mail: buzylev@mirea.ru.

*СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА ЩЕРБАКОВА – старший преподаватель РТУ МИРЭА.
E-mail: Shcherbakova@mirea.ru.*

ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ГРИБКОВ – бакалавр РТУ МИРЭА. E-mail: Johnnygry@yandex.ru.

119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

В данной статье рассмотрены методы измерения статодинамических деформаций элементов конструкции планера летательного аппарата, осуществлён выбор подходящего метода, рассмотрены средства измерения статодинамических деформаций, проведён сравнительный анализ характеристик средств измерений, определены их достоинства и недостатки и выбрано средство измерения, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым при проведении лётных испытаний.

Ключевые слова: Лётно-прочностные и флаттерные испытания, тензометрические датчики, мосты Уитстона, тензоаппаратура.

DEVICE FOR MEASURING THE STATIC-DYNAMIC DEFORMATIONS OF AIRCRAFT GLIDER STRUCTURAL ELEMENTS

F. N. Buzylev, S. N. Shcherbakova, E. V. Gribkov

78 Vernadsky Avenue, Moscow 119454. MIREA – Russian Technological University (RTU – MIREA).

The article defines methods for measuring dynamic deformations of aircraft glider structural elements, selects the appropriate method, considers the means of measuring static-dynamic deformations, performs a comparative analysis of the characteristics of measuring instruments, determines their advantages and disadvantages, and selects a measuring instrument that meets the requirements of flight tests.

Keywords: Flight strength and flutter tests, strain gauges, Wheatstone bridges.

Развитие авиационной промышленности привело к росту количества новых конструкционных материалов, применяемых при создании летательных аппаратов (ЛА) гражданской и военной авиации. Актуальной задачей является проведение прочностных и флаттерных испытаний. Основной проблемой проведения данных испытаний является получение качественных результатов измерения статодинамических деформаций элементов конструкции планера ЛА. Эта проблема состоит в выборе методов и средств измерений, необходимых для измерения и регистрации параметров деформаций. Данные методы и средства измерения должны обеспечивать высокую надёжность и точность измерения при эксплуатации во время проведения лётных испытаний ЛА, как в нормальных условиях, так и в жёстких условиях изменения влажности, давления и температуры окружающей среды. Лётно-прочностные и флаттерные испытания летательных аппаратов (ЛА) проводятся с целью обеспечения требуемых прочности и ресурса конструкции.

Наиболее массовыми электрическими элементами, используемыми для измерения величины силы, являются резистивные и полупроводниковые тензометрические датчики (тензодатчики). Тензодатчик измеряет силу косвенным методом – путем измерения деформации калиброванного элемента, вызванной действием данной силы. Резистивный тензодатчик представляет собой основание с закрепленным на нем резистивным элементом. Под действием силы основание с закрепленным элементом меняет свои размеры (сжимается или растягивается), следовательно, резистивный элемент изменяет свое сопротивление.

На рисунке 1 показан метод измерения сопротивления, состоящий в пропускании постоянного тока через резистивный датчик и измерении падения напряжения на нём [1].

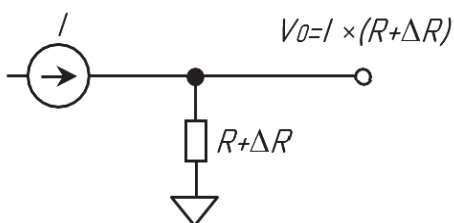


Рис. 1. Использование источника постоянного тока для непрямого измерения сопротивления

Для данного метода требуется точное удержание тока возбуждения и точное измерение выходного напряжения. Рассеиваемая на резистивном

датчике мощность должна быть малой во избежание ошибок, связанных с саморазогреванием. Поэтому, ток возбуждения должен быть малым.

Для точного измерения малых изменений сопротивления используются мосты Уитстона (рис. 2).

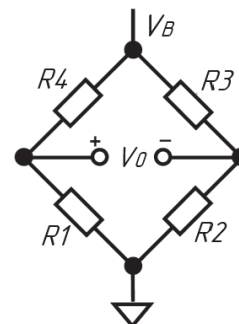


Рис. 2. Измерительный мост Уитстона

Мост находится в нулевом (сбалансированном) состоянии при $R1/R4 = R2/R3$ вне зависимости от способа его возбуждения (постоянным либо переменным током). В практике мосты возбуждаются постоянным напряжением или постоянным током. Метод возбуждения постоянным током более востребован, так как его преимуществом является отсутствие ошибок измерения из-за наличия сопротивления соединительных проводов, когда мост располагается далеко от системы регистрации. Различные конфигурации мостов при возбуждении постоянным током приведены на рис. 3.

Система тензодатчиков, которой оборудуется ЛА, должна обеспечить измерение при лётных исследованиях нагрузок, действующих на все основные части планера (крыло, фюзеляж, оперение, шасси), на рулевые поверхности (элероны, рули высоты и направления), на отклоняемые поверхности (закрылки, предкрылки) и системы трубопроводов (кабельные и топливные).

На крыло ЛА наклеиваются тензомосты, реагирующие на изгиб, на кручение и перерезывающую силу. Если на крыле подвешены двигатели, обязательно измеряются также нагрузки на пилоны их подвески. Тензодатчики наклеиваются также на узлы подвески элеронов, закрылков и элементы механизмов их управления. На ЛА с крылом изменяемой стреловидности наклеиваются датчики для оценки нагрузок на систему управления углом стреловидности. На фюзеляже наклеиваются тензодатчики, позволяющие оценивать нагружения, как носовой, так и хвостовой его частей. Предусматривается измерение изгибающих моментов в вертикальной и горизонтальной плоско-

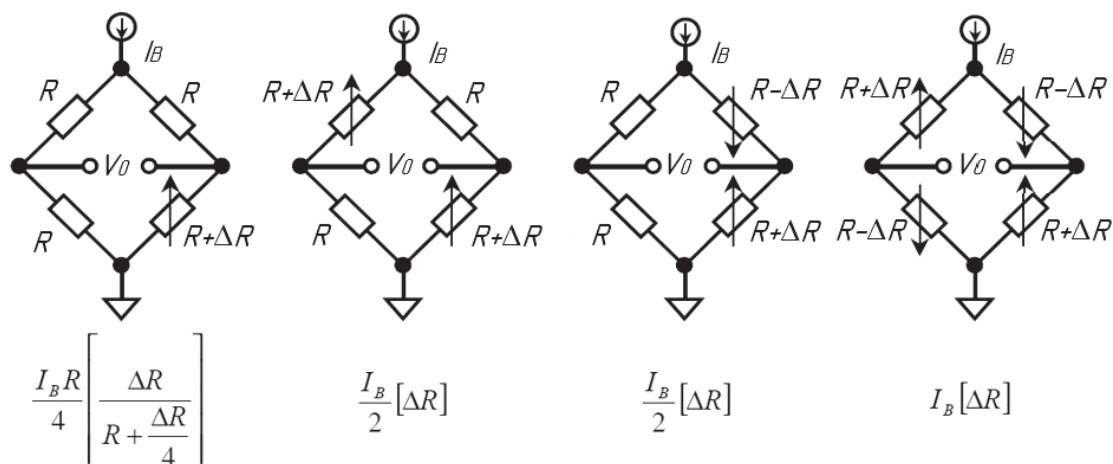


Рис. 3. Выходное напряжение для различных конфигураций мостов при возбуждении постоянным током

стях и крутящих моментов, действующих на хвостовую часть фюзеляжа. На горизонтальном оперении измеряются изгибающие моменты и перерезывающие силы. Измерение шарнирных моментов относительно осей поворота подвижных частей горизонтального оперения производится с учётом его конструктивной схемы.

На вертикальном оперении измеряются изгибающие моменты и крутящие моменты. Производится измерение шарнирного направления руля направления.

До 70 % всех измерений деформаций, при лётно-прочностных и флаттерных испытаниях летательных аппаратов, приходится на статодинамические деформации. Поэтому к устройству для измерения статодинамических деформаций предъявляются соответствующие требования, цель которых повысить надёжность и точность измерений.

При лётно-прочностных испытаниях используются различные тензорезисторы. В зависимости от места измерения деформаций они могут иметь различную конфигурацию, размеры и конструкцию. На практике применяются проволочные, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы сопротивлением от 100 до 350 Ом. Тензомодуль должен позволять проводить измерения с любым типом тензорезисторов.

Практика лётных испытаний показывает, что в одном эксперименте одновременно может производиться измерение деформаций разнородных конструктивных элементов. Поэтому тензомодуль должен обеспечивать независимую установку диапазонов чувствительности всех каналов.

В настоящее время существуют несколько средств измерений, позволяющих измерять деформации. Такими средствами являются система КАМ-500 американско-ирландской компании

ACRA CONTROL и тензоизмерительная аппаратура 16СУ27Ф производства АО «ЛИИ им. М.М. Громова». Данные средства измерения имеют свидетельства об утверждении типа средств измерений и указаны в Госреестре.

Системы измерительные КАМ-500 предназначены для измерений напряжения и силы постоянного и переменного тока, напряжения и силы тока произвольной формы, частоты следования импульсов, а также для регистрации и отображения результатов измерений. Они применяются при проведении измерений параметров силового, вспомогательного и специального оборудования летательных аппаратов в процессе их испытаний.

Принцип действия систем основан на преобразовании аналоговых сигналов от датчиков физических величин в цифровой код, обработке информации в контроллере, выдаче ее на внешние запоминающие устройства (накопители). Для преобразования значений напряжения, силы переменного тока, частоты и периода следования импульсов, поступающих от датчиков, в цифровой код используются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), имеющиеся в каждом ИК, соответствующего модуля из данной подсистемы.

Функционально системы состоят из измерительных подсистем, включающих в себя измерительные каналы (ИК), количество и назначение ИК определяют измерительные модули, размещаемые в модулях шасси. Измерительные модули определяют комплектацию системы. Измерительными модулями для измерения сигналов с мостов являются КАД/АDС/014 (рис. 4), которые предназначены для измерения напряжения постоянного тока дифференциальным методом, воспроизведения напряжения постоянного тока и воспроизведения силы постоянного тока [2].

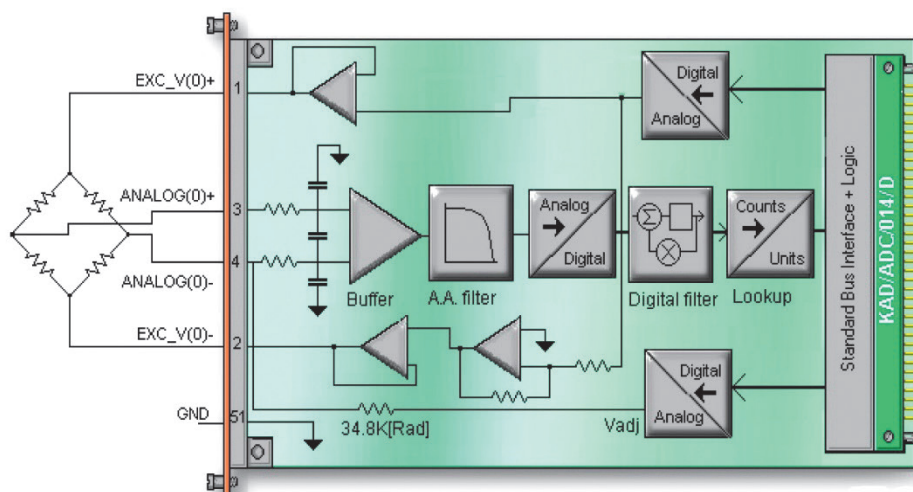


Рис. 4. 16-ти каналный измерительный модуль KAD/ADC/014/D для измерения сигналов с мостов

В измерительный канал данного модуля входят следующие элементы:

- два источника постоянного напряжения;
- RC – фильтр;
- дифференциальный усилитель;
- антиалайзинговый фильтр;
- АЦП;
- цифровой программируемый фильтр;
- цепь балансировки;
- ЦАП.

Существуют несколько модификаций модулей KAD/ADC/014/D: KAD/ADC/014/D/10V, KAM/ADC/014/D/10V, KAD/ADC/014/D/1V, KAM/ADC/014/D/1V, KAD/ADC/014/D/100M, KAM/ADC/014/D/100M и KAD/ADC/014/D/25M, KAM/ADC/014/D/25M. Данные модификации отличаются диапазоном измерений. Значение напряжения на выходе тензомоста при измерении статодинамических деформаций, как правило, находится в пределах от минус 50 до 50 мВ. В таблице 1 приведены

Таблица 1

Технические характеристики измерительных модулей KAD/ADC/014/D

Наименование характеристики	KAD/ADC/014/D/100M, KAM/ADC/014/D/100M	KAD/ADC/014/D/25M, KAM/ADC/014/D/25M
	Значение характеристики	
Число измерительных каналов	16	
Диапазон измеряемых значений напряжения постоянного тока при значении сопротивления нагрузки (тензомоста) 350 Ом, В	$-100 \cdot 10^{-3} \div 100 \cdot 10^{-3}$	$-25 \cdot 10^{-3} \div 25 \cdot 10^{-3}$
Пределы допускаемой приведенной* погрешности измерений напряжения постоянного тока, %:	$\pm 0,3$	$\pm 1,2$
Число каналов воспроизведения напряжения постоянного тока	8	
Диапазон рабочих температур, °С:	$-40 \div 85$	
Относительная влажность воздуха при значениях температуры до 60 °С, %	0 ÷ 95	
Синусоидальная вибрация:		
– диапазон частот, Гц	10 ÷ 2000	
– амплитуда ускорения, м/с ² (g), не более	98	
Диапазон воспроизводимых значений напряжения постоянного тока, В	0 ÷ 10,2	
Диапазон сопротивлений нагрузки (тензомоста), Ом	150 ÷ 350	

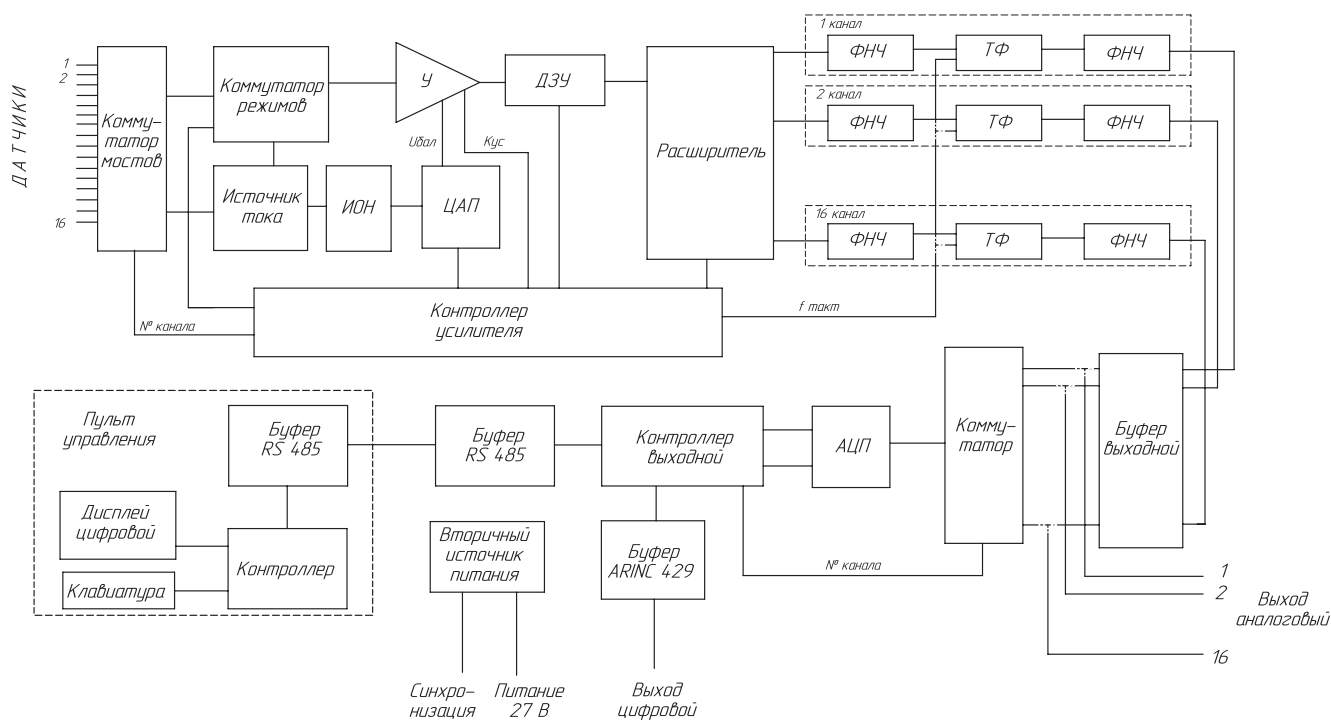


Рис. 5. Структурная схема тензоизмерительной аппаратуры 16CY27Φ

характеристики измерительных модулей KAD/ADC/014/D/100M, KAM/ADC/014/D/100M и KAD/ADC/014/D/25M, KAM/ADC/014/D/25M [3].

Аппаратура тензоизмерительная 16CY27Φ предназначена для измерений относительных напряжений тензодатчиков при измерениях статодинамических нагрузок в узлах и элементах конструкций. В её основе лежит метод питания тензомоста переменным током [4–6].

Принцип работы аппаратуры 16CY27Φ основан на преобразовании изменений сопротивления тензорезисторов, включённых по мостовой схеме, при деформациях конструкции в напряжение с последующим его усилением и фильтрацией. Её структурная схема представлена на рис. 5.

В измерительный канал данной аппаратуры входят следующие элементы:

Тензомодуль включает в себя следующие устройства:

- коммутатор мостов;
- источник тока;
- источник образцового напряжения (ИОН);
- коммутатор режимов;
- усилитель (У);
- динамическое запоминающее устройство (ДЗУ);
- цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);
- контроллер усилителя;
- расширитель;
- блок фильтров (фильтры нижних частот (ФНЧ) и тапированный фильтр (ТФ));

– буфер выходной.

Характеристики аппаратуры 16CY27Φ приведены в таблице 2 [6].

Проведение качественного сравнительного анализа данных средств измерений без применения натуральных испытаний практически невозможно, однако, исходя из вышеприведённых описаний и характеристик можно сделать следующие выводы:

Основными достоинствами модуля KAD/ADC/014/D являются цифровая обработка сигнала и малое количество аналоговых элементов, что имеет явное преимущество при работе модуля в условиях изменения рабочих температур, по сравнению с 16CY27Φ, измерительный канал которой полностью аналоговый, также, системы KAM-500 имеют в своём составе, помимо модулей подсистем, плату сбора информации и кассету памяти, позволяющие записывать полученные во время эксперимента данные, что исключает необходимость использования внешних накопителей.

Основными недостатками данных модулей являются:

- узкий диапазон измерения деформаций (один диапазон на модификацию) без возможности его переключения;
- восемь каналов из шестнадцати для воспроизведения напряжения сигнала на выходе модуля, но данный недостаток компенсируется за счёт добавления другого модуля в систему, которая

Технические характеристики аппаратуры 16СУ27Ф

Наименование характеристики	Значение характеристики
Число измерительных каналов	16
Диапазоны измерений при сопротивлении тензомоста 200 Ом, мВ/В	± 12
Диапазоны измерений в зависимости от сопротивления тензомоста рассчитываются по формуле:	± 6
$D = D200 \times R/200$,	± 3
где: D200 – диапазон измерений при сопротивлении тензомоста 200 Ом;	± 1,5
R – сопротивление тензомоста в Ом	± 0,75
	± 0,375
	± 0,1875
Пределы допускаемой основной относительной погрешности выходного напряжения, %	± 1,0
Диапазон рабочих температур, °С	-50 ÷ 85
Повышенная относительная влажность при температуре 35 °С, %	0 ÷ 98
Синусоидальная вибрация:	
– диапазон частот, Гц	10 ÷ 2000
– амплитуда ускорения, м/с ² (g), не более	98,1
Диапазон выходных напряжений, В	± 3
Диапазон сопротивлений нагрузки (тензомоста), Ом	100 ÷ 400

позволяет вместить в себя 13 модулей подсистемы, что можно отнести к достоинствам КАМ-500;

- наличие входного RC-фильтра, который не может обеспечить достаточную защиту от радиопомех, которые влияют на измеряемый сигнал;
- восприимчивость модуля к термо-ЭДС проводов линии связи с тензомостом, что вносит необходимость дополнительного учёта её влияния при обработке результатов.

Основными достоинствами аппаратуры 16СУ27Ф являются:

- широкий диапазон измерения деформаций, с возможностью индивидуальной установки на каждый измерительный канал, позволяющий учесть разнородность тензодатчиков и материалов, применяемых в конструкции ЛА;
- наличие чувствительных диапазонов измерения, таких как ± 1,5, ± 0,75, ± 0,375, ± 0,1875 мВ/В, что соответствует ± 8, ± 4, ± 2, ± 1 мВ выходного напряжения тензомоста при сопротивлении 200 Ом, и ± 14,4, ± 7,2, ± 3,6, ± 1,8 мВ при значении сопротивления тензомоста 350 Ом (при сравнении с характеристиками КАД/ADC/014/D, нормированными при сопротивлении тензомоста 350 Ом) позволяет осуществлять измерение деформаций конструктивных материалов повышенной прочности (топливопроводы, элементы конструкции шасси и др.) и определять малые опасные для ЛА вибра-

ции при проведении испытаний на флаттер, в безопасном для полёта режиме, что позволит предугадать возможность разрушения планера при увеличении амплитуды вибраций;

- применение метода питания тензомоста переменным током, что позволяет исключить влияния термо-ЭДС проводов линии связи, влияющей на точность измерения;
- наличие динамического запоминающего устройства, которое обеспечивает повышенную помехозащищённость. Данный процесс можно описать следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_c + U_{\text{п}} - (-U_c + U_{\text{п}}) = U_c + U_{\text{п}} + U_c - U_{\text{п}} = 2U_c,$$

где $U_{\text{вых}}$ – уровень сигнала на выходе ДЗУ; U_c – уровень входного сигнала; $U_{\text{п}}$ – напряжение помехи.

Основными недостатками данной аппаратуры являются:

- наличие большого количества аналоговых элементов на которые оказывается значительное влияние температуры окружающей среды из-за повышенной чувствительности материалов, применяемых при их изготовлении, что в свою очередь, влияет на надёжность всей схемы;
- отсутствие возможности записи, получаемой во время эксперимента информации без использования внешнего накопителя.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что проводя сравнение технических характеристик модуля KAD/ADC/014/D системы КАМ-500, с питанием тензомоста постоянным током и тензоизмерительной аппаратуры 16СУ27Ф с питанием моста переменным током видно, что большая часть основных характеристик данных средств измерений схожи по своим значениям. Однако, наличие более чувствительных диапазонов измерения деформаций позволяющих осуществлять измерение деформаций конструктивных материалов повышенной прочности и определять малые, опасные для ЛА вибрации при проведении испытаний на флаттер, в безопасном для полёта режиме, что позволяет предугадать возможность разрушения планера при увеличении амплитуды вибраций, питание тензомоста переменным током, при котором исключается влияние на измеряемый сигнал термо-ЭДС проводов линии связи, и лучшая помехозащищённость делает аппаратуру 16СУ27Ф

наиболее привлекательным вариантом для использования её при лётных испытаниях.

Литература

1. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков, по материалам семинара «Practical design techniques for sensor signal conditioning», автор перевода: Горшков Б.Л., фирма: ЗАО АВТЭКС, Москва.
2. КАМ-500 DATABOOK, ACRA CONTROL, 2005.
3. Описание типа средств измерений. Модули измерительные KAD/ADC/014/D, номер Госреестра 54051-13.
4. Аппаратура тензоизмерительная 16СУ27Ф, Руководство по эксплуатации, ИКПВ.404161.001РЭ, АО «ЛИИ им. М.М. Громова», Жуковский, 2019 г.
5. Аппаратура тензоизмерительная 16СУ27, Технические условия, ИКПВ.404161.001ТУ, АО «ЛИИ им. М.М. Громова», Жуковский, 2011 г.
6. Описание типа средств измерений. Аппаратура тензоизмерительная 16СУ27Ф номер Госреестра 77106-19.