

УДК 681.2.089

Д.Д. РОГАЛЕВ

ООО «Вист», Запорожье, Украина

**НОВЫЙ МЕТОД ПРОВЕРКИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕНЗОУСИЛИТЕЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

В работе предложен новый метод проверки амплитудно-частотной характеристики динамических и статодинамических тензоусилителей, используемых при прочностных исследованиях и испытаниях в авиакосмической промышленности, в частности, при разработке авиационных двигателей. Традиционные методы проверки не всегда соответствуют характеристикам новейших тензоусилителей и не всегда обеспечивают проверку в полном объеме. Предложенный метод характеризуется универсальностью, расширенным частотным диапазоном, возможностью проверять тензоусилители с погрешностью чувствительности до 0,1%, технологичностью. Предложенный метод был опробован на тензоусилителях, применяемых в АО «Мотор Сич». Предложенный метод может быть положен в основу системы автоматической комплексной проверки тензоусилителей.

Ключевые слова: динамический тензоусилитель, статодинамический тензоусилитель, прочностные исследования, амплитудно-частотная характеристика, калибровка, октавный спектр.

Введение

Динамическое и статодинамическое тензометрирование является одним из основных экспериментальных методов, используемых при прочностных исследованиях в авиакосмической промышленности, в частности, при разработке авиационных двигателей. Одним из основных компонентов тензометрических систем является динамический или статодинамический тензоусилитель (далее просто тензоусилитель). Тензоусилители могут быть выполнены в виде отдельного блока, входить в состав аппаратно-программного измерительного комплекса или входить в состав бесконтактной измерительной системы. При этом, благодаря развитию микроэлектроники, постоянно повышаются характеристики тензоусилителей, такие, как точность, соотношение сигнал/шум, частотный диапазон. Традиционные методы проверки не всегда соответствуют характеристикам новейших тензоусилителей и не всегда позволяют осуществить проверку в полном объеме. В последнее время широкое распространение получили многоканальные тензометрические системы, содержащие десятки и сотни каналов. В случаях, если эти системы являются бесконтактными и предназначены для установки на подвижных деталях (например, роторах авиационных двигателей), и, соответственно, тензоусилители подвергаются воздействию механических нагрузок и высоких температур, то проверку целесообразно проводить непосредственно до и после экспериментальных работ по прочностным исследованиям. Поэтому

актуальной является проблема технологичности и полноты проверок характеристик тензоусилителей.

1. Обзор методов проверок тензоусилителей

Рассмотрим существующие методы проверки тензоусилителей.

Проверка с помощью контрольно-градуировочного устройства (КГУ). КГУ представляет собой устройство, содержащее балку-камертон, на которую наклеивается тензорезистор. Специальная электромагнитная система поддерживает амплитуду колебаний балки. Амплитуда контролируется оператором с помощью оптической системы. К преимуществам такой проверки можно отнести то, что в процедуре проверки участвует вся измерительная система: тензорезистор, тензоусилитель, регистратор. Исключаются ошибки, которые могут возникнуть при определении чувствительности (отношения выходной сигнал/деформация) измерительной системы расчетным путем. Однако проверка производится только на одной частоте – частоте свободных колебаний камертона, около 120 Гц. Вопрос о чувствительности измерительной системы на других частотах остается открытым. К тому же погрешность тензорезистора, обычно большая, чем погрешность тензоусилителя, и низкая точность поддержания амплитуды колебаний не позволяют адекватно оценить погрешность именно тензоусилителя и своевременно обнаружить «уход» чувствительности.

Проверки с помощью различных генераторов (электрических) сигналов. Для анализа

таких методов рассмотрим структурную схему тензоусилителя, приведенную на рис. 1.

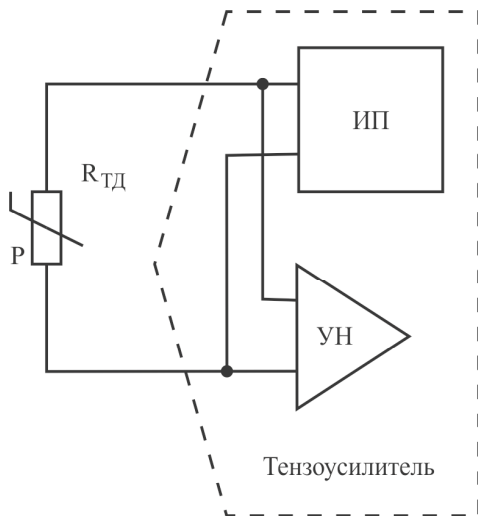


Рис. 1. Структурная схема тензоусилителя.
 $R_{ТД}$ – тензорезистор, ИП – источник питания тензорезистора, УН – усилитель напряжения

Обычно тензоусилитель состоит из усилителя напряжения (УН) и источника питания тензорезистора (ИП). С помощью генераторов сигналов часто амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) проверяется только для усилителя напряжения. Как видно из структурной схемы, АЧХ тензоусилителя определяется как АЧХ усилителя напряжения, так и АЧХ источника питания тензорезистора.

Так, например, в тензоусилителях, описанных в [1], метрологически нормируется АЧХ только усилителя напряжения. Параметры источника питания тензорезистора проверяются в режиме измерения постоянного тока/напряжения. АЧХ источника питания не нормируется и не проверяется. Для проверки работоспособности используют аналогично [2] генератор прямоугольных тестовых сигналов. Система считается работоспособной, если выходной сигнал «примерно» соответствует входному.

В [3] описан имитатор сигналов датчиков, который применялся для оценки дополнительной погрешности, возникающей из-за фактора центробежного ускорения в рабочем диапазоне частот вращения бесконтактной контрольно-измерительной системы. Проверка с имитатором не является полной, так как выход тензоусилителя в этом случае не зависит от выходного напряжения источника питания тензорезистора.

Методика проверки тензоусилителей, приведенная в [4], обеспечивает проверку только усилителя напряжения. А АЧХ источника пита-

ния тензорезистора не проверяется. Приведенная методика не позволяет с использованием доступного оборудования провести проверку на низких частотах (ниже 20 Гц).

В методике калибровки, приведенной в [5], калибровку проводят с помощью магазина образцовых сопротивлений, в режиме постоянного сигнала. Также в тензоусилителе, описанном в [5], имеются встроенные точные резисторы, которые используются для проверки статической чувствительности методом шунта. Проверка методом шунта широко используется для статических тензоусилителей и заключается в подключении параллельно тензорезистору (или резистору, заменяющему тензорезистор при калибровке) другого, высокоомного резистора [6]. Таким образом, проверка АЧХ тензоусилителя, описанного в [5], не входит в процедуру периодической калибровки.

В устройстве, описанном в [7], калибровка осуществляется с помощью встроенного калибровочного резистора номиналом 0,1 Ом, включаемого последовательно с тензорезистором. Калибровка осуществляется подключением дополнительного резистора на фиксированной частоте 500 Гц. Отметим, что, во-первых, работа с резистором такого малого сопротивления достаточно сложна, во-вторых, калибровка осуществляется на одной частоте и АЧХ не проверяется.

Отметим, что некоторые из приведенных выше методик не являются универсальными и рассчитаны на определенный тип тензоусилителя.

Таким образом, совершенствование методов проверки тензоусилителей является актуальной задачей. Цель данной статьи представить методику проверки АЧХ тензоусилителей, которая обладает такими свойствами:

1. Возможность работы в широком частотном диапазоне, от 0 Гц.
2. Возможность проверять тензоусилители с погрешностью чувствительности до 0,1%.
3. Универсальность: методика пригодна для работы с любыми динамическими и статодинамическими тензоусилителями.
4. Использование в качестве источника входного сигнала сопротивления, зависящего от времени.

2. Новый метод проверки амплитудно-частотной характеристики тензоусилителей

В предлагаемом методе проверки АЧХ, который мы будем называть методом коммутации шунта, тензоусилители предлагается проверять с помощью схемы, представленной на рис. 2.

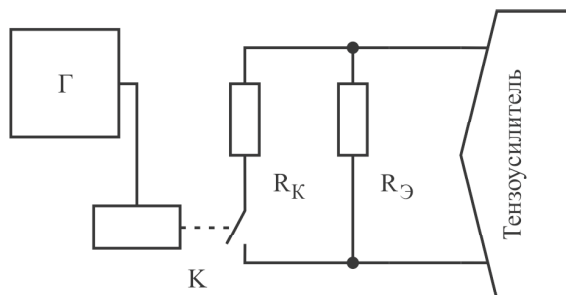


Рис. 2. Схема определения АЧХ тензоусилителя методом коммутации шунта

Г – генератор прямоугольных сигналов; К – ключ;
 $R_Э$ – резистор, сопротивление которого равно сопротивлению тензорезистора; R_K – калибровочный резистор (шунт)

Сопротивление резистора $R_Э$ соответствует сопротивлению тензорезисторов, обычно находится в пределах 20-400 Ом. Сопротивление R_K должно обеспечивать необходимый размах переменной составляющей сопротивления и может принимать значения от единиц до сотен кОм.

Генератор формирует прямоугольные импульсы, со скважностью 2, которые управляют ключом К. В результате работы ключа сопротивление на входе тензоусилителя зависит от времени. Переменная составляющая этой зависимости, если пренебречь переходными процессами, представляет собой прямоугольный сигнал.

Проверять АЧХ тензоусилителя предлагается по первой гармонике входного сигнала. Среднеквадратичное значение первой гармоники входного сигнала можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{ср.кв.1}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{R_Э^2}{R_Э + R_K}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ср.кв.1}}$ – среднеквадратичное значение первой гармоники входного сигнала;

$R_Э$ – сопротивление резистора, подключаемого вместо тензорезистора при калибровке;

R_K – калибровочное сопротивление.

Способ измерения амплитуды первой гармоники зависит от конкретного типа тензоусилителя. Для тензоусилителей, сигнал с которых записывается на компьютер, можно использовать программы построения полосовых спектров, в частности октавного спектра. Для тензоусилителей с аналоговым выходом можно использовать анализатор спектра.

Отметим, что погрешность переменной составляющей входного сигнала определяется формулой:

$$\varepsilon_R = 2\varepsilon_{R_Э} + \varepsilon_{R_K}, \quad (2)$$

где ε_R – погрешность переменной составляющей входного сигнала;

$\varepsilon_{R_Э}$ – допуск номинала сопротивления $R_Э$;

ε_{R_K} – допуск номинала сопротивления R_K .

Таким образом, при использовании широко распространенных и дешевых резисторов с допуском 0,1%, погрешность переменной составляющей входного сигнала составляет не более 0,3%, что позволяет проверять тензоусилители, у которых АЧХ задана с точностью 1%. Для тензоусилителей, у которых АЧХ задана с точностью 0,1%, соответственно необходимо использовать резисторы с допуском 0,01%. Сопротивление ключа К должно быть малым, чтобы не вносить дополнительную погрешность. В качестве ключа К можно использовать высококачественные интегральные коммутаторы, например ADG708 с сопротивлением в открытом состоянии 0,3 Ом.

Чувствительность тензоусилителя рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{КШ}} = \frac{U_{\text{ср.кв.1}}}{R_{\text{ср.кв.1}} / R_Э}, \quad (3)$$

где $K_{\text{КШ}}$ – коэффициент чувствительности тензоусилителя, определенный методом коммутации шунта;

$U_{\text{ср.кв.1}}$ – среднеквадратичное значение 1-й гармоники выходного сигнала, определенное по октавному спектру.

Или, с учетом (1):

$$K_{\text{КШ}} = \frac{U_{\text{ср.кв.1}}}{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{R_Э}{R_Э + R_K}}. \quad (4)$$

Сформулируем кратко порядок проведения экспериментов и обработки результатов для метода коммутации шунта.

1. Собирается схема, приведенная на рис. 2.
2. С генератора на управление ключа подается меандр с частотами, соответствующими центральным частотам октавного спектра.
3. Вычисляется октавный спектр в каждом эксперименте.
4. Рассчитывается $K_{\text{КШ}}$ по формуле (4) для каждого значения частоты.

3. Экспериментальная проверка

Были проведены сравнительные проверки АЧХ по предложенной методике и по традиционной [4]. В традиционной методике использо-

вался вольтметр переменного напряжения ВЗ-33, позволяющий измерять напряжения в сотни микровольт с погрешностью 1%. В предложенной методике использовались резисторы с допуском 0,1%. В таблице 1 представлены результаты сравнительной проверки АЧХ тензоусилителя двумя разными методами. Приведены коэффициенты чувствительности тензоусилителя, определенные предложенным методом $K_{КШ}$ и традиционным методом K_T , а также относительная разность коэффициентов чувствительности δ , определяемая по формуле:

$$\delta = \frac{K_{КШ} - K_T}{K_T} \cdot 100\% \quad (5)$$

Таблица 1.
Результаты сравнительной проверки АЧХ тензоусилителя предложенным и традиционными методами

Частота, Гц	$K_{КШ}$, мВ/(мОм/Ом)	K_T , мВ/(мОм/Ом)	δ , %
5	0,4468	—	—
10	0,4655	—	—
20	0,4706	0,4695	0,24
40	0,4721	0,4711	0,20
125	0,4728	0,4714	0,31
1000	0,4728	0,4709	0,41
4000	0,4725	0,4710	0,31
10000	0,4728	0,4711	0,36
20000	0,4746	0,4716	0,65
24000	0,4757	0,4721	0,78
24900	0,4670	0,4636	0,73

В частотном диапазоне 20–25000 Гц разница коэффициентов чувствительности, полученная

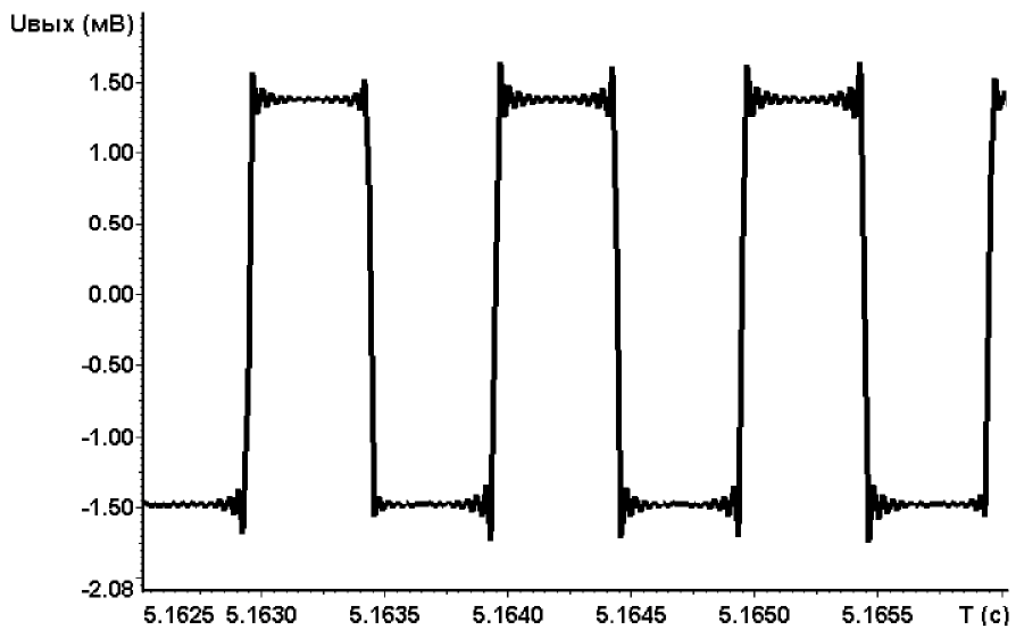


Рис. 3. Типичная осциллограмма выходного сигнала при проверке АЧХ методом коммутации шунта

двумя методами, составила менее 1%, что соответствует классу точности вольтметра ВЗ-33. На рис. 3 приведена осциллограмма выходного сигнала при проверке АЧХ методом коммутации шунта, полученная в одном из экспериментов. Осцилляции на фронтах сигнала являются следствием работы цифрового фильтра тензоусилителя. По предложенной методике было проверено около 200 каналов динамических тензоусилителей для предприятия АО «Мотор Сич».

Заключение

Предложен метод проверки АЧХ динамических тензоусилителей, использующий для формирования входного сигнала коммутацию шунта. Предложенный метод, по сравнению с существующими, обладает рядом преимуществ:

1. Расширенный частотный диапазон, от 0 Гц.
2. Позволяет проверять тензоусилители с погрешностью чувствительности до 0,1%.
3. Предложенный метод является универсальным и пригоден для проверки любых тензоусилителей.
4. В качестве источника входного сигнала используется сопротивление, зависящее от времени.
5. Как показала практика, предложенный метод удобнее и технологичнее, по сравнению с традиционными.

Предложенная методика может быть положена в основу системы автоматической комплексной проверки тензоусилителей.

Помимо чувствительности, такая система может проверять линейность, фазовый сдвиг между каналами, взаимовлияние каналов и другие параметры.

Предложенная методика может быть применена в системах самодиагностики тензоусилителей.

Предложенная методика может быть использована при разработке источников калибровочного сигнала для проверки бесконтактных измерительных систем.

Литература

1. МХ-310. Модуль АЦП с тензоусилителем. Руководство пользователя, редакция 2.9, НПП «Мера», Мытищи. 2011. – 21 с.

2. Firth Douglas R. Balanced Constant Current Excitation for Dynamic Strain Measurements [Text] / Douglas R. Firth, Alan R. Szary // Precision Filters, Inc. Ithaca. – New York (607) 277 – 3550 – 16 p.

3. Владов Михаил. Адаптивная телеметрическая система контроля двигателей летательных аппаратов: автореф. дис. д-ра техн. наук: 02.21.07 / Владов Михаил, ИКИТ – София, 2012. – 45 с.

4. Бесконтактная тензометрическая система ТМС-БВ-8. Программа и методика метрологической аттестации АРАЕ 1.291.001 ПМА – 2012. – 14 с.

5. National Instruments Corp NI 9235, NI 92368 – Channel Quarter – Bridge Strain Gage Modules URL: [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374645a.pdf>.

6. Electrical Resistance Strain Gage Circuits URL: [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://soliton.ae.gatech.edu/people/jcraig/classes/ae3145/Lab2/straingages.pdf>.

7. Fylde Electronic Laboratories Ltd: Dynamic Strain Gauge Measurements using the FE-537-SGAURL: [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.fylde.com/dyn_measure.html.

Поступила в редакцию 01.06.2014

Д.Д. Рогалев. Новий метод перевірки амплітудно-частотної характеристики динамічних тензопідсилювачів, застосовуваних при випробуваннях на міцність

У роботі запропоновано новий метод перевірки амплітудно-частотної характеристики динамічних і статодинамічних тензопідсилювачів, використовуваних при дослідженнях і випробуваннях на міцність в авіакосмічній промисловості, зокрема, при розробці авіаційних двигунів. Традиційні методи перевірки не завжди відповідають характеристикам новітніх тензопідсилювачів і не завжди забезпечують перевірку в повному обсязі. Запропонований метод характеризується: універсальністю, розширеним частотним діапазоном, можливістю перевіряти тензопідсилювачі з похибкою чутливості до 0,1%, технологічністю. Запропонований метод був випробуваний на тензопідсилювачах, застосовуваних в АТ «Мотор Січ». Запропонована методика може бути покладена в основу системи автоматичної комплексної перевірки тензопідсилювачів.

Ключові слова: динамічний тензопідсилювач, статодинамічний тензопідсилювач, дослідження на міцність, амплітудно-частотна характеристика, калібрування, октавний спектр.

D.D. Rogalev. A new method for verification frequency response of dynamic strain amplifier used in strength test

In this paper, we propose a new method for checking the frequency response of strain amplifier used in research and testing in the aerospace industry, in particular in the development of aircraft engines. Traditional methods of verification does not always correspond to characteristics of new strain amplifier and do not always provide the full check. The proposed method is characterized by versatility, extended frequency range, the ability to check the sensitivity of strain amplifier with an error of 0.1%, simplicity. The proposed method was tested on a strain amplifiers used in Motor Sich JSC. The proposed method can be the basis of a automatic test system of strain amplifier.

Key words: dynamic strain amplifier, static-dynamic strain amplifier, strength research, frequency response, calibration, octave spectrum.