

УДК 629.423

*Д-р техн. наук Леонец В.А.*

## БОРТОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС БВК-6

**Ключевые слова:** несущая конструкция локомотива, БВК-6, тензометрическая система, погрешность измерения, напряжения, деформации.

### Введение

Вопросы продления назначенного срока службы железнодорожных локомотивов, электро-дизель поездов, вагонов при условии обеспечения заданной надежности работы их механических несущих конструкций (НК) экипажных частей (рам тележек, рам кузовов, несущих кузовов) имеют в настоящее время важное значение для ПАО «Укрзалізниця». Расчет вероятности появления усталостных трещин в НК локомотивов производится вероятностными методами [1, 2] по исходным данным тензометрирования их «слабых» мест. По результатам тензометрирования определяются блоки механических напряжений [3], возникающих в НК тягового и моторвагонного подвижного состава (ТМВПС). Тензометрирование проводится по заданным программам для определенной статистической выборки ТМВПС в процессе их эксплуатации (в составе поездов) в течение длительного времени [3]. Как правило, общее число этих мест обычно не превышает десятка. Поэтому применение в этом случае вагонов-лабораторий [4, 5 и др.], предназначенных для проведения ходовых динамико-прочностных испытаний с большим количеством измерений, представляется нам нерациональным из-за больших эксплуатационных расходов.

В этой связи возникла необходимость создания специализированных бортовых малогабаритных, полностью автоматизированных приборов, предназначенных для тензометрирования НК ТМВПС в процессе их эксплуатации. Все известные в настоящее время бортовые и напольные тензометрические системы [5-7] выполнены на базе мо-

стовой измерительной цепи (мост Уитстона). К основным недостаткам такого преобразователя относится существенная нелинейность его функции преобразования при измерении больших деформаций и существенная температурная погрешность измерений, обусловленная температурными изменениями сопротивления проводов линий связи измерительных тензорезисторов с электронным блоком преобразователя.

**Целью статьи** является описание устройства и работы созданного сотрудниками ИПП им. Г.С.Писаренко НАН Украины и ГП «Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины» (далее - ГНИЦ УЗ), при поддержке Главного управления локомотивного хозяйства Укрзалізниця (далее - ЦТ) бортового измерительного комплекса - прибора БВК-6 [8], который лишен известных недостатков мостовых измерительных приборов. Принятые конструкторские решения при создании прибора БВК-6 обеспечивают его высокую эксплуатационную надежность при проведении тензометрических измерений напряженно-деформированного состояния деталей и элементов НК ТМВПС в процессе их эксплуатации.

В основу разработки прибора положены следующие основные требования:

- обеспечение малых габаритов электронного блока БВК-6;
- обеспечение автономности питания электронного блока в продолжение всего контрольного рейса подвижного состава;
- обеспечение высокой помехоустойчивости линий связи тензорезисторов с электронным блоком в условиях проявления мощных промышленных помех;
- возможность применения длинных «накидных» кабельных линий связи при минимизированном сечении проводов;
- возможность произвольной вариации длины линий связи, исключая влияние этого фактора на точность измерений.

Выполнение указанных требований обеспечивается предлагаемым схемотехническим решением [9] измерительных каналов прибора и выбором соответствующей современной элементной базы.

### Конструктивные особенности измерительного устройства

Бортовой измерительный комплекс БВК-6 предназначен для измерения деформаций элементов НК подвижного состава и верхнего строения пути железнодорожного транспорта в реальных условиях эксплуатации (рис. 1). Измерения производятся синхронно по шести измерительным каналам посредством «одиночных» фольговых тензорезисторов. Измеренные данные регистрируются сменным запоминающим устройством типа флэш-диска «Е», с возможностью последующей перезаписи результатов измерений в ПЭВМ и обработки их по заданному алгоритму. В реальном масштабе времени измерения производятся с применением ПЭВМ типа Notebook в качестве регистрирующего прибора.



Рис. 1 - Внешний вид прибора БВК-6

Под понятием «одиночный» тензометрический датчик подразумевается один измерительный тензорезистор (ТР) в качестве чувствительного элемента отдельного измерительного канала. Измерительные ТР наклеиваются в заданных контрольных местах (тензометрических постах) исследуемой НК ТМВПС цианакриловым клеем «моментальной» полимеризации. Наклеенные ТР герметизируются воскоподобным консервантом типа «Мовиль» под пылевлагозащитным эпоксидным покрытием, пригодным к длительной эксплуатации. Связь между тензометрическими постами и электронным блоком БВК-6 осуществляется «накидными» (нестационарными) разъемными кабельными линиями связи. Штатный комплект кабелей

линии связи отдельного измерительного канала БВК-6 содержит 4-х проводные разъемные кабельные отрезки длиной (5+10+15) метров, с сечением проводов 0,08 мм<sup>2</sup>.

Электронный блок БВК-6 предназначен для работы в температурном диапазоне внешней среды от минус 40 до +50<sup>0</sup>С, имеет автономное питание от аккумуляторной батареи и может быть размещен в любом пригодном для установки месте в обрессоренном кузове подвижного состава. Период времени непрерывной работы БВК-6 в режиме регистрации результатов измерений определен электроемкостью батареи питания при расчетном токе потребления 1 А.

В комплексе БВК-6 реализована дифференциальная схема измерений [9] с компенсационным тензорезистором (ТК), который наклеивается на конструктивно отдельный образец из того же материала, что и исследуемая конструкция, и размещается по отдельной линии связи в непосредственной близости к измерительным ТР для обеспечения оптимальных условий термокомпенсации. Измерительная система БВК-6 образована двумя «триадами» (тройками) измерительных ТР, каждой из которых соответствует один ТК. Такая конфигурация измерительной системы обеспечивает возможность реализации схемной термокомпенсации измерительных тензорезисторов двух триад, размещаемых на элементах НК имеющих разные температуры, и обеспечивает возможность регистрации сложно-напряженного состояния исследуемой конструкции посредством трехэлементных тензорезисторных розеток или измерение трех компонент векторных величин. Количество одновременно работающих приборов БВК-6 не ограничено.

Функциональная схема измерительной системы отдельной триады представлена на рисунке 2, где  $R_{T1} \dots R_{T3}$  – измерительные, а  $R_K$  – компенсационный тензорезисторы, включенные последовательно с опорным резистором  $R_0$  в выходную цепь стабилизатора постоянного тока, управляемого изменением напряжения и выполненного по схеме [10] с операционным усилителем 1 типа ОР284 в цепи обратной связи. Резистор  $R_0$  включен в цепь для «взвешивания» потенциалов выводов тензорезистора  $R_{T3}$  относительно потенциала в общей шине триады, что обеспечивает нормализацию работы после-

дуючого усилительного каскада. Стабілізатор току забезпечує подавлення шумів нормального виду (диференціальних) в цепи живлення тензорезисторів на рівні частот

більше 100 дБ, визначеного величиною коефіцієнта  $K_{CT}$  стабілізації току (табл. 1).

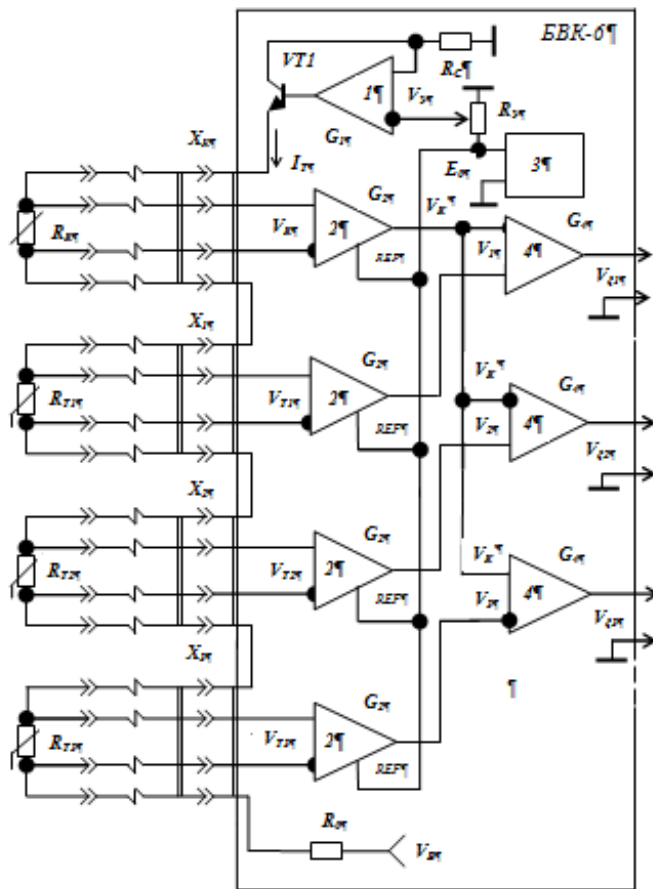


Рис. 2 - Функціональна схема вимірної системи триади приладу БВК-6

Табл. 1 - Оцінка погрешности вимірної каналу БВК-6 при зміні опору проводів ліній зв'язу тензорезисторів з електронним блоком

Параметр	Исходные данные	Расчетная формула	Результаты вычислений
1. Приращение сопротивления проводів ліній зв'язу при произвольной вариации длины кабеля от 0 до 30 м для исходных данных:			
- максимальная длина $L$ кабеля, м	30	$\Delta r_L = 2L \cdot r_{ног}$	$\sim 15 \text{ Ом}$
- погонное сопротивление $r_{ног}$ медного провода сечением $0,08 \text{ мм}^2$ , Ом/м	0,219	$\Delta r_t = \Delta r_L \cdot \rho \cdot  \Delta t $	
при изменении температуры от 0 до $+50^\circ\text{C}$ для кабеля длиной 30 м и исходных данных:			
- температурный коэффициент $\rho$ сопротивления медного провода, $\%/^\circ\text{C}$	0,426		
- диапазон $ \Delta t $ изменения температуры окружающей среды, $^\circ\text{C}$	50		$\sim 3 \text{ Ом}$

2. Крутизна преобразования стабилизатора тока при исходных данных: - выходной ток $I_T$ , мА - управляющее напряжение $U_V = I_T R_C$ , В - сопротивление $R_C$ контрольного тензорезистора (датчика тока), Ом	8,0 0,8 100	$S_T = I_T / U_V$	10 мА/В
3. Коэффициент стабилизации тока при исходных данных: - коэффициент усиления $G_I$ операционного усилителя 1 (OP284) при разомкнутой цепи обратной связи	$2 \cdot 10^5$	$K_{CT} = \frac{1}{1 + S_T G_I R_C}$	$5 \cdot 10^{-6}$
4. Погрешность от изменения сопротивления проводов линий связи при вариации длины кабеля для исходных данных: - сопротивление $R$ тензорезистора рабочей партии, Ом - коэффициент тензочувствительности $K_T$ при изменении температуры для исходных данных: - деформация $\varepsilon_N$ нормирующего значения, $\text{млн}^{-1}$	100 2,0 $\pm 1500$	$\gamma r_L = \frac{\Delta r_L K_{CT}}{R K_T \varepsilon_N} \cdot 100 \%$ $\gamma r_i = \frac{\Delta r_i K_{CT}}{R K_T \varepsilon_N} \cdot 100 \%$	0,025 % 0,005 %

Выводы каждого из тензорезисторов соединены, соответственно, с дифференциальными входами измерительных усилителей 2, типа AD620, выполненных по определённой схеме [10, с.451]. Усилитель AD620 обеспечивает коэффициент подавления помех общего вида (синфазных) по входным цепям на уровне более 100 дБ (данные сертификата). Входное сопротивление усилителя 2 составляет 10 ГОм, что практически исключает влияние изменения сопротивления проводов входных цепей усилителя на точность измерений. Опорные выводы REF усилителей 2 соединены между собой и с выходом источника 3 постоянного стабилизированного напряжения, типа REF02, обеспечивающего исходную балансировку выходных сигналов усилителей 2. Показания встроенного температурного датчика микросхемы REF02 используются для термокомпенсации температурной погрешности  $\Delta U_{TA}$  измерительных каналов, реализуемой в программном обеспечении. Выходы измерительных усилителей 2 тензорезисторов  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ ,  $R_{T3}$  соединены соответственно с неинвертирующими входами дифференциальных усилителей 4 типа

OP284. Инвертирующие входы усилителей 4 соединены между собой и с выходом измерительного усилителя 2 компенсационного тензорезистора  $R_K$ . Вывод функции преобразования измерительного канала приведен в [9].

На выходах усилителей 4 (рис. 2) формируются выходные сигналы измерительных каналов вида:

$$U_{\xi i} = I_T \cdot R \cdot G_2 \cdot G_4 \cdot \varepsilon_i = M_\varepsilon \cdot \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $I_T$  – ток питания тензорезисторов;  $R$  – номинал сопротивления тензорезисторов в составе рабочей партии;  $G_2$  – коэффициент усиления измерительных усилителей 2;  $G_4$  – коэффициент усиления дифференциальных усилителей 4;  $\varepsilon_i$  – относительное значение измеряемой деформации,  $M_\varepsilon$  – масштабный коэффициент преобразований измерительного канала.

Величина измеряемой деформации определяется по формуле:

$$\varepsilon_i = \Delta R_\varepsilon / R \cdot K_T = U_{\xi i} / M_\varepsilon, \quad (2)$$

где  $K_T$  - коэффициент тензочувствительности ТР;  $\Delta R_e/R$  - относительное значение приращения сопротивления ТР при воздействии деформации. Регулировкой  $G_4$  масштабный коэффициент преобразований измерительного канала установлен равным  $M_\varepsilon = 1 \text{ мВ/млн}^{-1}$ , при исходных данных:  $R = 100 \text{ Ом}$ ;  $K_T = 2,2$ ;  $U_{\xi N} = \pm 1500 \text{ мВ}$ . Напряжения в материале исследуемой конструкции определяются по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = E \cdot \varepsilon_i, \quad (3)$$

где  $E$  - модуль упругости материала детали или элемента конструкции.

Выходные сигналы измерительных каналов БВК-6 преобразуются в цифровую форму посредством 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей, с последующей записью результатов измерений через микропроцессор на флэш-диск «Е» в виде осциллограмм текущего времени. В качестве регистрирующего устройства измерительного комплекса в режиме реального времени измерений используется ПЭВМ типа Notebook, с операционной системой «Windows-XP». Связь между электронным блоком БВК-6 и ПЭВМ осуществляется через интерфейсы RS232, RS485, CAN, JBC. Программное обеспечение комплекса БВК-6 состоит из двух программ:

- программа регистрации (записи) осциллограмм (программа «БВК»);
- программа просмотра записи осциллограмм (программа «АНАЛИЗ»).

В программе «АНАЛИЗ» предусмотрены следующие виды коррекции результатов измерений по каждому измерительному каналу:

- коррекция неточности исходной балансировки;
- коррекция исходной градуировки;
- коррекция аддитивной температурной составляющей инструментальной погрешности измерительных каналов электронного блока БВК-6 по показаниям датчика температуры, встроенного в микросхему REF02;

- коррекция чувствительности канала согласно паспортным значениям параметров  $R'$  и  $K_T'$  тензорезисторов рабочей партии.

Коррекция исходной балансировки, градуировки, чувствительности и аддитивной составляющей температурной погрешности производится согласно формуле:

$$U_{\xi i} = (M_\varepsilon \cdot M_R \cdot \varepsilon_i - \Delta U_0) \cdot M_N - \Delta U_{iA}, \quad (4)$$

где  $\Delta U_0$  - исходный небаланс выходного сигнала измерительного канала;  $\Delta U_{iA}$  - температурная погрешность измерительного канала;  $M_N$  - коэффициент коррекции исходной градуировки;  $M_R$  - коэффициент коррекции чувствительности.

Значение коэффициента коррекции чувствительности измерительного канала определяется по формуле:

$$M_R = \frac{R \cdot K_T}{R' \cdot K_T'}, \quad (5)$$

где  $R = 100,0 \text{ Ом}$ ;  $K_T = 2,2$ ;  $R'$  и  $K_T'$  - паспортные значения параметров тензорезисторов рабочей партии.

Значение коэффициента коррекции градуировки определяется по формуле:

$$M_N = \frac{U_N}{U_{\xi N} - \Delta U_0}, \quad (6)$$

где  $U_{\xi N}$  - градуировка измерительного канала;  $\Delta U_0$  - неисключенная погрешность балансировки измерительного канала;  $U_N$  - нормирующее значение выходного сигнала. Исходные значения корректируемых погрешностей определяются по результатам метрологической аттестации и периодических поверок прибора.

#### **Инструментальная погрешность измерительного канала**

В таблице 2 приведены допустимые значения составляющих инструментальной погрешности отдельного измерительного канала, определенные по результатам предварительных натурных испытаний и метрологической аттестации опытной партии приборов БВК-6.

Табл. 2 - Составляющие инструментальной погрешности измерительного канала БВК-6

Наименование	Обозначение	Допустимое значение, %	Примечание
1. Неисключенная погрешность балансировки	$\gamma_0$	0,3	При температуре +20 °С
2. Неисключенная погрешность градуировки	$\gamma_N$	0,3	При температуре +20 °С
3. Аддитивная составляющая температурной погрешности измерительного канала	$\gamma_{tA}$	0,5	При температуре от минус 40 до +50 °С
4. Погрешность временной нестабильности измерительного канала	$\gamma_T$	0,3	За межповерочный интервал $T = 1$ год
5. Погрешность нелинейности тензометрического преобразователя	$\gamma_{NL}$	менее 0,1	В режиме измерения деформации
6 Погрешность от изменения напряжения источника питания	$\gamma_B$	менее 0,1	$V_B = 10 \pm 2$ В
7. Погрешность от изменения сопротивления проводов линий связи	$\gamma_r$	менее 0,1	$r_L = 0,5 \dots 15$ Ом
8. Температурная погрешность (СКО) компенсационного тензорезистора	$S_{tm}$	75 млн <sup>-1</sup>	При температуре от минус 70 до 0 °С
	$S_{th}$	23 млн <sup>-1</sup>	При температуре от 0 до +50 °С
9. Мультипликативная составляющая температурной погрешности измерительного канала	$\gamma_{tM}$	менее 0,1	При температуре от минус 40 до +50 °С

Составляющие погрешности  $\gamma_0$  и  $\gamma_N$  определены установленным допуском на исходную настройку измерительного канала. Составляющие  $\gamma_{tA}$ ,  $\gamma_{tM}$ ,  $\gamma_T$ ,  $\gamma_B$  определены по результатам метрологической аттестации и контрольных проверок прибора. Составляющие  $S_{ti}$  определены разбросом температурных характеристик измерительного и компенсационного тензорезисторов в составе рабочей партии (паспортные данные) в заданном температурном диапазоне. Составляющие  $\gamma_B$ ,  $\gamma_r$ ,  $\gamma_{tM}$  исключены из расчета инструментальной погрешности измерительного канала по критерию «ничтожности влияния фактора», принятого равным 0,1 % по отношению к нормирующему значению  $\varepsilon_N$  измеряемой деформации. Погрешность нелинейности  $\gamma_{NL}$  самого тензорезистора при измерении деформации принимается равной нулю. Составляющие  $S_{ti}$  исключены из расчета, так как учитываются в расчетной формуле (9) погрешности измерения деформации.

Влияние изменения сопротивления проводов  $\Delta r$  (табл. 1) линий связи на точность измерений можно представить дифференци-

альной помехой вида  $I_T \Delta r$ , которая ослабляется пропорционально коэффициенту  $K_{CT}$  стабилизации тока питания. Погрешность от изменения сопротивления проводов токовых линий связи определяется отношением действующего сигнала помехи к заданному диапазону изменения падения напряжения на тензорезисторе под воздействием деформации:

$$\gamma_r = \frac{I_T \Delta r K_{CT}}{I_T \Delta R_N} = \frac{\Delta r K_{CT}}{R K_T \varepsilon_N}, \quad (7)$$

где  $\Delta R_N = R \cdot K_T \cdot \varepsilon_N$  - приращение сопротивления тензорезистора под воздействием деформации  $\varepsilon_N$  нормирующего значения. Расчет погрешности для заданных исходных данных приведен в таблице 1. Величина погрешности составляет  $\gamma_{ri} < 0,1\%$  и может быть исключена из расчета согласно принятому критерию «ничтожности влияния фактора».

Среднее квадратическое отклонение (СКО) инструментальной погрешности измерительного канала в режиме работы «тензометра» (измерение деформации), без учета исключен-

ных из расчета составляющих  $\gamma_i$ , определяется по упрощенной формуле:

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{S_0^2 + S_N^2 + S_{tA}^2 + S_T^2}, \quad (8)$$

где величины СКО составляющих погрешности, с целью повышения надежности оценки, определены из условия:  $S_i = \gamma_i/2$ . При исходных данных:  $S_0 = S_N = S_T = 0,15\%$  и  $S_{tA} = 0,25\%$ , инструментальная погрешность измерительного канала комплекса БВК-6, используемая в качестве инструментальной составляющей погрешности измерения деформации, определена значением  $\sigma_{\xi} = 0,4\%$ .

### Погрешность измерения деформаций

Погрешность измерительного канала комплекса БВК-6 в режиме измерения деформации  $\Delta \epsilon$  определяется по развернутой расчетной формуле нормативной инструкции МИ 1347-86 [11] для схемы измерений одиночного тензодатчика с компенсационным тензорезистором:

$$\Delta \epsilon = \pm \{ (0,01 \cdot Q_t \cdot \epsilon_N) + \lambda \cdot \sqrt{\epsilon_N^2 \left[ \left( \frac{S_K}{\tilde{K}_T} \right)^2 + \left( \frac{S_{\Phi t}}{\tilde{\Phi}(t)} \right)^2 + (0,01 S_{Qt})^2 \right] + \left( \frac{1}{\tilde{K}_T \tilde{\Phi}(t)} \right)^2 (2S_{ii}^2 + 2S_{Dt}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{\lambda}^2)} \}, \quad (9)$$

где  $\epsilon_N$  - нормирующее значение измеряемой деформации;

$K_T$  - чувствительность ТР при нормальной температуре;

$\Phi(t)$  - значение функции влияния температуры на чувствительность при температуре Т;

$Q_t$  - ползучесть при температуре Т в момент времени т;

$\sim$  - обозначение среднего значения параметра метрологической функции;

$\lambda$  - коэффициент, зависящий от заданной вероятности Р и вида закона распределения погрешностей. В методике МИ 1347 значение коэффициента принято равным  $\lambda=2$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ ;

$S_K$  - среднее квадратическое отклонение (СКО) чувствительности;

$S_{\Phi t}$  - СКО функции влияния температуры на чувствительность (максимальное значение в заданном температурном диапазоне);

$S_{Qt}$  - СКО ползучести при максимальной температуре;

$S_{ii}$  - СКО температурной характеристики электрического сопротивления (максимальное значение в заданном температурном диапазоне);

$S_{Dt}$  - СКО дрейфа выходного сигнала тензорезистора;

$\sigma_{\xi}$  - СКО инструментальной погрешности измерительного канала;

$\sigma_{\lambda}$  - СКО погрешности, обусловленной изменением сопротивления проводов линий связи.

Значения составляющих погрешности  $\sigma_i$  приведены в таблице 3 при нормирующем значении измеряемой деформации  $\epsilon = \epsilon_N$ .

Табл. 3 – Расчет составляющих погрешности измерения деформации комплексом БВК-6

Составляющие погрешности согласно МИ 1347-86	Исходные данные	Расчетная формула	Результат расчета
1. Неисключенная систематическая погрешность ползучести при исходных данных: - среднее значение $Q_t$ часовой ползучести при максимальной температуре, % - заданное нормирующее значение $\epsilon_N$ деформации тензорезистора, млн <sup>-1</sup>	- 0,9  ±1500	$\gamma_Q = 0,01 \cdot \tilde{Q}_t \cdot \epsilon_N$	- 14 млн <sup>-1</sup>

2. Неисключенная погрешность чувствительности при исходных данных: - среднее значение $K_T$ коэффициента тензочувствительности в партии - СКО чувствительности $S_K$ при нормальной температуре	2,18 0,02	$\sigma_K^2 = \left( \frac{S_K}{K_T} \right)^2 \cdot \varepsilon_H^2$	$(189 \text{ млн}^{-1})^2$
3. Неисключенная погрешность функции $\Phi_t$ влияния температуры на чувствительность: - СКО $S_\Phi$ функции влияния температуры на чувствительность, %	0	$\sigma_\Phi^2 = \left( \frac{S_\Phi}{K_T} \right)^2 \cdot \varepsilon_H^2$	0
4. Неисключенная погрешность ползучести при исходных данных: - СКО часовой ползучести $S_{Qt}$ при максимальной температуре, %	0,2	$\sigma_{Qt}^2 = (0,01 \cdot S_{Qt})^2 \cdot \varepsilon_H^2$	$(9 \text{ млн}^{-1})^2$
5. Погрешность разброса ТХС измерительного и компенсационного тензорезисторов при исходных данных: - СКО температурной характеристики $S_t$ электрического сопротивления тензорезистора, $\text{млн}^{-1}$ при температуре + 50 °С при температуре минус 70 °С - значение функции $\Phi_t$ влияния температуры на чувствительность	23 75 1	$\sigma_t^2 = \left( \frac{1}{\tilde{K}_t \cdot \tilde{\Phi}_t} \right)^2 \cdot 2S_t^2$	$(223 \text{ млн}^{-1})^2$ $(2367 \text{ млн}^{-1})^2$

Исходные данные для расчета погрешностей определены паспортными значениями метрологических характеристик тензорезисторов типа КФ5, ТУ У 3.06 7710-0001-93 [12]. Влияние температуры на чувствительность тензорезисторов, изготовленных на базе константанового провода, практически отсутствует в диапазоне от криогенных до высоких температур [13], что позволяет принять значение функции влияния температуры на тензорезистор  $\Phi(t) = 1$  и исключить из расчетной формулы составляющую  $S_{\Phi t} = 0$ . Применение схемы питания тензорезисторов от стабилизатора тока практически исключает влияние температурных изменений  $\Delta r_t$  сопротивления проводов линий связи на точность измерений (табл. 1), что позволяет исключить из расчетной формулы (9) составляющую  $\sigma_{\Delta r} < 0,1 \%$ , согласно принятому критерию «ничтожности влияния фактора».

Общая погрешность измерения деформации комплексом БВК-6 определяется по формуле:

$$\Delta \varepsilon = \pm [ |\gamma_Q| + \lambda \cdot \sqrt{\sigma_K^2 + \sigma_\Phi^2 + \sigma_{Qt}^2 + \sigma_t^2 + \sigma_D^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_L^2} ], \quad (10)$$

и в диапазоне измерений  $\varepsilon_N = \pm 1500 \text{ млн}^{-1}$ , с вероятностью  $P = 0,95$ , составляет:

- при температуре от 0 °С до +50 °С:

$$\Delta \varepsilon = \pm [ |-14| + 2 \cdot$$

$$\sqrt{189 + 0 + 9 + 223 + 27 + 8 + 0} ] = \pm 57 \text{ млн}^{-1}$$

$(\gamma_\varepsilon \approx 4 \%)$ .

- при температуре от минус 70 °С до 0 °С:

$$\Delta \varepsilon = \pm [ |-14| + 2 \cdot$$

$$\sqrt{189 + 0 + 9 + 2367 + 27 + 8 + 0} ] = \pm 116 \text{ млн}^{-1}$$

$(\gamma_\varepsilon \approx 8 \%)$ .

$\gamma_\varepsilon$  – относительная погрешность измерения деформаций.

Приведенные оценки погрешности хорошо согласуются с результатами расчета погрешностей различных типов тензорезисторов, приведенных в [13].

**Область применения измерительного комплекса БВК-6**

Сокращение общего числа компенсационных тензорезисторов в измерительной систе-



ме и возможность применения длинных «накидных» кабельных линий связи с малым сечением проводов существенно упрощает монтаж многоэлементных тензометрических систем измерительного комплекса. Применение системы питания тензорезисторов от стабилизатора тока обеспечивает высокую помехоустойчивость входных цепей, линейность выходной статической характеристики измерительного канала и практически исключает влияние изменения сопротивления штатных проводов линий связи на точность измерений. Указанные преимущества определяют область более эффективного применения комплекса БВК-6 при испытаниях технических объектов, по сравнению с существующими тензометрическими системами, выполненными на основе моста Уитстона, в решении следующих измерительных задач:

- тензометрия больших деформаций (единицы процентов) без нелинейных искажений выходной статической характеристики измерительного канала ;
- тензометрия движущихся (вращающихся) объектов, с передачей измерительной информации через скользящие контакты;
- высокотемпературная тензометрия (например, в турбинах), в условиях воздействия мощных и непостоянных во времени температурных градиентов на провода линий связи тензорезисторов.
- возможность проведения экспресс-анализа напряженных состояний в «слабых» местах несущих конструкций железнодорожного подвижного состава в процессе его эксплуатации.

Опытная партия приборов БВК-6 (3 шт), прошедших государственную метрологическую аттестацию, была успешно применена при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний локомотивов серий: ВЛ60в/и, ВЛ10, ТЭП70, ЧС4, ЧС7, ЧС8, ДС3, с целью продления назначенных сроков службы их НК, модернизации отдельных узлов и механических элементов конструкций.

Опыт разработки прибора, с использованием одного измерительного тензорезистора

в качестве чувствительного элемента, позволил создать нуль-индикаторный (дифференциальный) метод [14, 15] мониторинга зарождения усталостных повреждений в сварных соединениях материалов и элементов конструкций, обеспечить спектральный вайлет-анализ их блочного нагружения [16] и ускоренный метод оценки стабильности технологии сварки, позволяющие существенно сократить время опытной эксплуатации транспортных машин.

### **Выводы**

Созданный, благодаря тесному сотрудничеству разработчиков-изготовителей ИПП имени Г.С.Писаренко НАН Украины и ГНИЦ УЗ, тензометрический измерительный комплекс, в состав которого входит прибор БВК-6, соответствует современному мировому уровню тензоизмерительных систем и может применяться при исследованиях напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций, узлов, деталей, в том числе вращающихся, железнодорожного подвижного состава в процессе его эксплуатации; выявлении в них зарождения трещин; ускоренной оценке качества изготовления сварных соединений по критерию усталостной прочности.

### **Литература**

- 1.Серенсен С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие/ С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. - М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
- 2.Когаев В. П., Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник/ В. П.Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. - М.: Машиностроение, 1985, - 224 с.
- 3.Леонець В.А. Визначення блока напружень, що виникають в рамах візків залізничних локомотивів з метою оцінки їх залишкового ресурсу/ В.А. Леонець, О.А. Леонець, О.Д. Токарев // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. - №27. – С. 282 – 286.
4. Хацкелевич А.А. Измерительно-вычислительный комплекс вагона-лаборатории для испытаний подвижного состава / А.А. Хацкелевич, М.С.Пястик, А.В.

Андреев и др. // Вестник ВНИИЖТ. – 1999. - №5. - С. 43 - 47.

5. Тесленко В. А. Универсальная тензометрическая станция / Тесленко В. А. // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2003. - № 1-2. – С. 14 - 20.

6. Хворос И. В. Многоцелевая компьютеризованная система сбора и обработки информации об электромеханических параметрах подвижного состава/ И. В.Хворос, О.В. Черных, С.И. Ясько и др. // Науч. труды Кременчуг. гос. политехн. ун-та. – 2001. – Вып. 1. – С. 248 -252.

7. Zottl W. Condition detection – an intelligent solution/ W. Zottl // European railway review. - 2006. – 4. – P. 21-25.

8. Токарев О. Д. Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения / О. Д. Токарев, В. А. Леонец, А. А. Леонец и др. // Железнодорожный транспорт мира. – 2002. – №9. – С.73-76.

9. Пат. 15642 Україна, МПК G 01 B 7/16. Тензометричний перетворювач / Токарев О.Д., Грищенко С.Г., Лашко А.Д. та інші. Заявник та патентотримач Державний науководослідний центр Укрзалізниці. – №u200512611; заявл. 27.12.05; опубл. 17.07.06, Бюл. №7.

10.Хоровиц П. Искусство схемотехники/ П. Хоровиц, У. Хилл. - М.: Мир, 1983. – Том. 1. – 598с.

11. Дайчик М. Л. Методы и средства натурной тензометрии. Справочник/ М. Л.Дайчик, Н. И. Пригоровский, Г. Х. Хур-

шудов. - М.: Машиностроение, 1989. - С. 195 – 205.

12. АЖВ2 782.001 ПС. Тензорезисторы КФ4 и КФ5. Паспорт партии 673.

13. Клокова Н. П. Тензорезисторы. Теория, методика расчета, разработки/ Н. П. Клокова. - М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

14. Leonets V. A. Assessment of the null-indicator method for the detection of fatigue cracks in structural elements / V. A. Leonets, A. O. Lukashevych, V. A. Degtyarev and other // Strength of Materials. – 2012. – (44), №3. – P. 325 – 332.

15. Lukashevich A. O. Strain-Gauge Method of Detecting Subcritical Fatigue Cracks in Low-Carbon Steel Welds/ A. O. Lukashevich, V. A. Leonets, L. M. Chau// Strength of Materials. – 2015. – (47), №3. – P.467 – 473.

16. Лукашевич А. А. Расчетно-экспериментальный метод определения составляющих спектра нестационарного нагружения сварного соединения углеродистой стали / А. А. Лукашевич // Автоматическая сварка. – 2016. – №3(751). – С.31 – 34.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Леонец Виктор Адамович,**

д. т. н., ведущий научный сотрудник Института проблем прочности имени Г.С. Писаренко НАН Украины.

Ул. Тимирязевская, 2, г. Киев, Украина, 01014.

Тел.: +38 044 281 63 43; +38 066 737 54 98.

E-mail: leonV@ipp.kiev.ua.

## РЕКЛАМА В ЖУРНАЛІ «ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ»

**З питань розміщення реклами в науково-практичному журналі**

**«Залізничний транспорт України»,**

**який видається філією «Науково-дослідний та конструкторсько-**

**технологічний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця»,**

**звертайтеся на ім'я директора філії, за адресою: 03038, м. Київ, вул. І. Федорова, 39 або в редакцію журналу, за телефоном +38 (044) 309-68-93 чи на**

**електронну пошту журналу: ztu@uz.gov.ua; ztu1520mm@gmail.com.**