

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 620.1:624.01

В. П. ТАРАСЕНКО<sup>1\*</sup>, В. Л. РЫКИНА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. (0562) 33 58 12, эл. почта vikptaras@mail.ru

<sup>2</sup> ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. (0562) 33 58 12

### ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МОСТОВ И ДРУГИХ СООРУЖЕНИЙ

**Цель.** В связи с внедрением новых конструкций мостов и других сооружений актуальным является использование при их испытаниях электрических методов измерений, при которых измеряемые прогибы, напряжения и колебания с помощью датчиков-преобразователей превращаются в электрические сигналы. При этом весьма важным является обеспечение фазочувствительности и пропорциональности между измеряемыми механическими величинами и электрическими сигналами. **Методика.** При электрических измерениях датчики-преобразователи подключаются к электрическим цепям мостового типа. Расчёты моста Уитстона при различных подключениях датчиков-преобразователей производились на основе законов Кирхгофа для разветвлённых электрических сетей и с использованием преобразования электрической схемы, при котором в исходной схеме моста Уитстона группа сопротивлений замещается другой эквивалентной группой сопротивлений. Расчёты проведены для случаев наличия и отсутствия внутреннего сопротивления источника питания моста при подключении датчиков-преобразователей в одно, два и четыре плеча моста Уитстона. **Результаты.** На основе выполненных расчётов получены таблицы и графики функций  $f_i(\alpha)$  и  $f_{0i}(\alpha)$ , определяющих изменение тока в измерительной диагонали моста Уитстона, где  $\alpha$  – относительное изменение сопротивлений датчиков-преобразователей. При одном активном датчике функции  $f_1(\alpha)$  и  $f_{01}(\alpha)$ , характеризуются большой нелинейностью, но для тензорезисторов при  $\alpha = \pm(0,01...0,02)$  приемлемая линейность и точность измерений обеспечиваются. **Научная новизна.** На основе анализа результатов проведенных расчётов установлены зависимости величины тока в измерительной диагонали моста Уитстона при различных схемах подключения датчиков-преобразователей для измерения при испытаниях напряженно-деформированного состояния в элементах конструкций. Учитывается также величина внутреннего сопротивления элементов питания мостовой электрической схемы. Расчёты выполнены с использованием законов Кирхгофа и путем эквивалентного преобразования разветвлённой электрической сети. **Практическая значимость.** Полученные в работе графики функции  $f_i(\alpha)$  и  $f_{0i}(\alpha)$  и приведенная таблица позволяют оценивать условия обеспечения линейности указанных зависимостей при различных подключениях датчиков-преобразователей. Мостовые схемы включения тензорезисторов дают возможность выделять при испытаниях напряжения в элементах конструкций от действия нормальных сил, а также от вертикальных и горизонтальных изгибающих моментов.

**Ключевые слова:** статические и динамические испытания; тензорезисторы; датчики-преобразователи; электрические методы измерений; электрические сети; мост Уитстона; расчёт электрических сетей; законы Кирхгофа; метод преобразования схемы; активные и компенсационные тензорезисторы; подключение тензорезисторов

#### Введение

При статических и динамических испытаниях мостов и других конструкций для определения фактических условий работы их под действием современных нагрузок наряду с традиционным использованием механических изме-

рительных приборов широко используются электрические методы измерения прогибов и перемещений конструкций и напряжённого состояния в элементах [1, 2].

Комплекс измерительных приборов при использовании электрических методов измерений

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

при испытаниях конструкций включает датчики-преобразователи, многоканальные электронные усилители и регистрирующие приборы [3].

С помощью датчиков-преобразователей величины относительных деформаций (напряжений), прогибов и перемещений точек конструкций преобразуются в электрические сигналы (изменения тока или напряжений), которые усиливаются и записываются в память компьютера. Для измерения напряжённого состояния используются тензорезисторы, которые наклеиваются на элементы конструкций и деформируются вместе с ними. Тензорезисторы используются также в чувствительных элементах датчиков больших перемещений [4, 5].

Тензорезисторы имеют величину сопротивления до 100...200 Ом. Изменение сопротивлений тензорезисторов при относительных деформациях  $(5...10) \cdot 10^{-6}$  составляет тысячные доли Ом. Измерение сопротивлений такого порядка с высокой точностью возможно только с использованием электрических цепей мостового типа.

Электрическая схема моста Уитстона (рис. 1) представляет четыре сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , соединённые в виде замкнутой цепи. К диагонали CD моста подключен источник питания с электродвижущей силой  $E$ , а в другую (измерительную) диагональ AB – высокочувствительный гальванометр с сопротивлением  $R_5$ . При расчёте токов в ветвях мостовой электрической схемы учитывается также величина внутреннего сопротивления  $R_6$  источника питания.

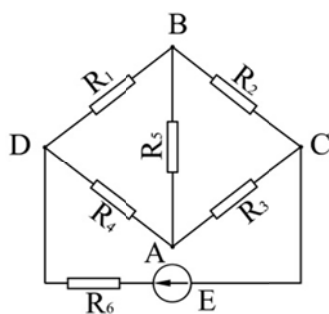


Рис. 1. Схема моста Уитстона

Полумост из тензорезисторов для каждого канала включает рабочий тензорезистор  $R_1$ , наклеенный на элемент конструкции, и компенсационный тензорезистор  $R_2$ , изменение

величины сопротивления которого, происходит только от изменения температуры.

Равновесие моста Уитстона, при котором ток в измерительной диагонали  $I_5$  равен нулю, определяется условием

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (1)$$

При одинаковом изменении сопротивлений тензорезисторов  $R_1$  и  $R_2$  от изменения температуры нарушения равновесия моста не происходит.

Под действием эксплуатационных нагрузок в результате деформирования конструкции и изменения сопротивления тензорезистора  $R_1$  на величину  $\Delta R_1 = R_1(1 - \alpha)$  условие баланса моста нарушается и в измерительной диагонали моста появится ток  $I_5$ , где  $\alpha$  – относительное изменение сопротивления тензорезистора.

### Цель работы

Целью исследования является определение условий, при которых зависимость тока  $I_5$  в измерительной диагонали моста Уитстона от измеряемых напряжений и прогибов конструкции была бы близкой к линейной. В простейшем случае, когда активный тензорезистор включается в одно плечо моста, зависимость  $I_5 = f(\alpha)$  является нелинейной, однако при небольших деформациях и перемещениях конструкций этой нелинейностью можно пренебречь.

Для количественного учёта влияния указанных нелинейностей построены графики функций  $f(\alpha)$  при различных схемах подключения тензорезисторов или других датчиков-преобразователей.

При измерении напряжённого состояния в изгибаемых элементах для повышения чувствительности и улучшения линейности рабочие тензорезисторы наклеиваются на растянутых и сжатых волокнах элемента конструкции и включаются в плечи  $R_1$  и  $R_2$ , образующие полумост.

Современные индуктивные датчики больших перемещений с подвижными ферромагнитными сердечниками для измерения статических и динамических прогибов висячих и вантовых мостов и осадок понтонов наплавных

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

мостов также подключаются по схеме полумоста или полного моста.

## Методика расчёта

Расчёты сложных разветвленных электрических сетей проводятся на основе использования двух законов Кирхгофа или с использованием преобразования схемы электрической цепи [6, 7].

Обычно задачей расчёта разветвлённых электрических цепей является определение токов и напряжений во всех или части участков цепи.

Для мостовой электрической схемы наиболее приемлемым является метод преобразования схемы. Этот метод заключается в том, что в исходной разветвлённой схеме замещается группа сопротивлений другой эквивалентной группой сопротивлений, в которой сопротивления соединены иначе, чем в замещаемой группе. Взаимная эквивалентность указанных групп сопротивлений выражается в том, что после такой замены электрические условия во всей остальной схеме не изменяются.

Применительно к схеме моста Уитстона при наличии внутреннего сопротивления  $R_6$  источника питания исходная и преобразованная схемы приведены на рис. 2, где в исходной схеме моста часть сопротивлений, соединённых по схеме треугольника, заменена эквивалентным соединением по схеме звезды. В результате такой замены получено более простое смешанное соединение сопротивлений (см. рис.2, б).

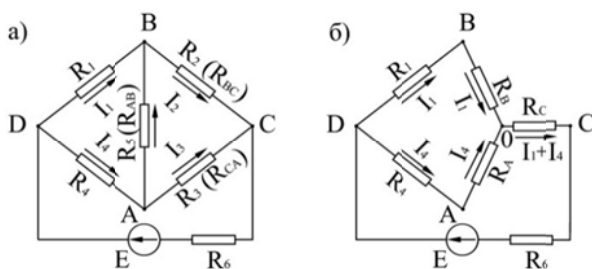


Рис. 2. Упрощение схемы с заменой части соединений по схеме треугольника на соединения по схеме звезды

Условие эквивалентности звезды и треугольника выполнено путём сопоставления межузловых сопротивлений и проводимостей этих двух схем, в результате которого получено:

$$R_A = R_{AB} \cdot R_{CA} / \Sigma R_{\Delta} = R_5 \cdot R_3 / (R_5 + R_2 + R_3)$$

$$R_B = R_{BC} \cdot R_{AB} / \Sigma R_{\Delta} = R_2 \cdot R_5 / (R_5 + R_2 + R_3) \quad (2)$$

$$R_C = R_{CA} \cdot R_{BC} / \Sigma R_{\Delta} = R_3 \cdot R_2 / (R_5 + R_2 + R_3)$$

Для преобразованной схемы, показанной на рисунке (см. рис. 2, б), со смешанным (параллельным и последовательным) соединением сопротивлений сила суммарного тока  $I = I_1 + I_4$  вычисляется по формуле:

$$I = \frac{E}{R_{\text{сум}}} = \frac{E}{(R_C + R_6) + \frac{(R_1 + R_B)(R_4 + R_A)}{(R_1 + R_B) + (R_4 + R_A)}} \quad (3)$$

Величины токов  $I_1$  и  $I_4$  в ветвях преобразованной схемы пропорциональны проводимости ветвей и определяются по формулам

$$I_1 = \frac{E}{(R_C + R_6) \left(1 + \frac{R_1 + R_B}{R_4 + R_A}\right) + (R_1 + R_B)}$$

$$I_4 = \frac{E}{(R_C + R_6) \left(1 + \frac{R_4 + R_A}{R_1 + R_B}\right) + (R_4 + R_A)} \quad (4)$$

Такие же величины токов  $I_1$  и  $I_4$  будут в элементах DB и DA исходной мостовой схемы.

Для замкнутого контура DBA согласно первому закону Кирхгофа имеем:

$$I_1 \cdot R_1 - I_4 \cdot R_4 - I_5 \cdot R_5 = 0,$$

откуда находится величина тока  $I_5$  в измерительной диагонали моста

$$I_5 = \frac{E}{R_5} \cdot \frac{R_1}{(R_C + R_6) \left(1 + \frac{R_1 + R_B}{R_4 + R_A}\right) + (R_1 + R_B)} - \frac{E}{R_5} \cdot \frac{R_4}{(R_C + R_6) \left(1 + \frac{R_4 + R_A}{R_1 + R_B}\right) + (R_4 + R_A)}, \quad (5)$$

где величины  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_C$  зависят от сопротивлений элементов мостовой электрической схемы и определяются формулами (2).

Как правило, на выходе из датчиков-преобразователей электрический сигнал имеет линейную зависимость от величины напряжения или измеряемых прогибов и перемещений.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Анализ изменения тока  $I_5$  в измерительной диагонали моста Уитстона при одном активном и одном компенсационном датчиках-преобразователях выполнен при следующих соотношениях сопротивлений моста:

$$R_1 = R(1 + \alpha), R_2 = R_3 = R_4 = R, R_5 = 0,25R, R_6 = 0,1R \text{ и } R = 200 \text{ Ом.}$$

С учётом зависимостей (2) и (4) находим

$$R_A = \frac{R}{1 + 2R/R_5} = \frac{R}{9}; R_B = \frac{R}{1 + 2R/R_5} = \frac{R}{9};$$

$$R_C = \frac{R}{1 + R_5/R} = \frac{R}{2,25}; I_5 = \frac{E}{R_5} \cdot f_1(\alpha); \quad (6)$$

$$f_1(\alpha) = \frac{1 + \alpha}{\left(\frac{1}{2,25} + 0,1\right)(2 + 0,9\alpha) + \frac{1 + 0,9\alpha}{0,9}} - \frac{1}{\left(\frac{1}{2,25} + 0,1\right)\left(\frac{2 + 0,9\alpha}{1 + 0,9\alpha}\right) + \frac{1}{0,9}} \quad (7)$$

где  $E/R_5$  – множитель, зависящий от величины ЭДС источника питания  $E$  и сопротивления  $R_5$  гальванометра,  $f_1(\alpha)$  – функция (в общем случае нелинейная), зависящая от коэффициента  $\alpha$  и указанных сопротивлений элементов моста Уитстона.

В случае малой величины внутреннего сопротивления  $R_6$  источника питания (при  $R \gg R_6$ ) можно исключить слагаемое  $R_6$  в формуле (5) и слагаемое 0,1 формулы (7) и получить, как частный случай, функцию  $f_{01}(\alpha)$ :

$$f_{01}(\alpha) = \frac{1 + \alpha}{\frac{1}{2,25}(2 + 0,9\alpha) + \frac{1 + 0,9\alpha}{0,9}} - \frac{1}{\frac{1}{2,25}\left(\frac{2 + 0,9\alpha}{1 + 0,9\alpha}\right) + \frac{1}{0,9}} \quad (8)$$

## Результаты

Значения функций  $f_1(\alpha)$  и  $f_{01}(\alpha)$  при изменении  $\alpha$  от +0,8 до -0,8 приведены в табл. 1, а на рис. 3 помещены графики функций  $f_1(\alpha)$  и  $f_{01}(\alpha)$ .

Таблица 1

Результаты вычислений функций  $f_1(\alpha)$ ,  $f_2(\alpha)$ ,  $f_{01}(\alpha)$  и  $f_{02}(\alpha)$

$\alpha$	$f_1(\alpha)$	$f_2(\alpha)$	$f_{01}(\alpha)$	$f_{02}(\alpha)$
0,80	0,0236	0,1029	0,0256	0,1165
0,70	0,0216	0,0821	0,0235	0,0931
0,60	0,0194	0,0653	0,0211	0,0729
0,50	0,0170	0,0513	0,0185	0,0580
0,40	0,0143	0,0393	0,0156	0,0434
0,30	0,0113	0,0284	0,0124	0,0314
0,20	0,0080	0,0185	0,0088	0,0204
0,10	0,0043	0,0091	0,0047	0,0101
0,05	0,0022	0,0046	0,0024	0,0050
0	0	0	0	0
-0,05	-0,0023	-0,0046	-0,0026	-0,0050
-0,10	-0,0049	-0,0091	-0,0054	-0,0101
-0,20	-0,0105	-0,0185	-0,0116	-0,0204
-0,30	-0,0171	-0,0284	-0,0190	-0,0314
-0,40	-0,0249	-0,0393	-0,0278	-0,0434
-0,50	-0,0344	-0,0513	-0,0385	-0,0580
-0,60	-0,0459	-0,0653	-0,0517	-0,0729
-0,70	-0,0605	-0,0821	-0,0686	-0,0931
-0,80	-0,0794	-0,1029	-0,0909	-0,1165

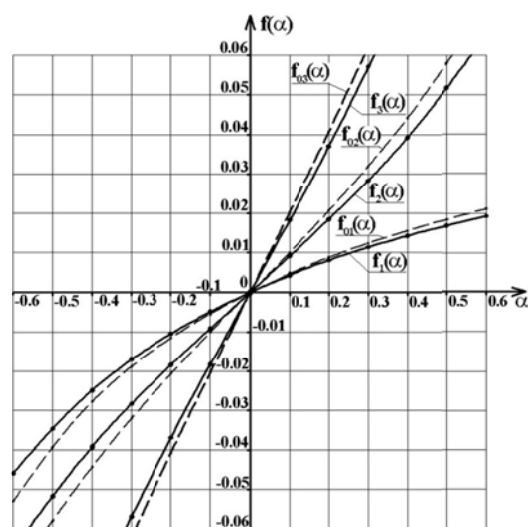


Рис. 3. Графики функций  $f_i(\alpha)$  и  $f_{0i}(\alpha)$  ( $i = 1, 2, 3$ )

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для указанного диапазона изменения коэффициента  $\alpha$  значения функций  $f_1(\alpha)$  и  $f_{01}(\alpha)$  характеризуются большой нелинейностью, но при  $\alpha = \pm(0,01...0,02)$  приемлемая линейность и точность измерений обеспечивается.

В приведенной таблице (см. табл. 1) помещены также результаты расчёта для случая подключения тензорезисторов или дифференциальных датчиков больших перемещений в соседние плечи моста (при  $R_1 = R(1+\alpha)$ ,  $R_2 = R(1-\alpha)$ ,  $R_3 = R_4 = R$ ).

В этом случае чувствительность возрастает практически в два раза, а диапазон изменения коэффициента  $\alpha$ , при котором обеспечивается линейность, увеличивается на 1,5...2 порядка (см. рис. 3). При этом положительные и отрицательные ветви кривых  $f_2(\alpha)$  и  $f_{02}(\alpha)$  имеют ось симметрии, совпадающую с началом координатных осей.

На рисунке (см. рис. 3) показаны также кривые функций  $f_3(\alpha)$  и  $f_{03}(\alpha)$ , построенные для случая, когда все четыре плеча моста Уитстона активны (при  $R_1 = R(1+\alpha)$ ,  $R_2 = R(1-\alpha)$ ,  $R_3 = R(1+\alpha)$ ,  $R_4 = R(1-\alpha)$ ), что обеспечивает увеличение чувствительности ещё в два раза и дальнейшее улучшение линейности функций  $f_3(\alpha)$  и  $f_{03}(\alpha)$ .

## Выводы

Использование электрических методов измерений при испытаниях мостов и других сооружений позволяет получить большой объём информации о работе конструкций не только при статическом, но и при динамическом воздействии нагрузок. Основным требованием при использовании электрических методов измерений при испытаниях является обеспечение ли-

нейной зависимости между измеряемыми механическими величинами и регистрируемыми электрическими сигналами.

Полученные графики функций  $f_i(\alpha)$  и  $f_{0i}(\alpha)$  позволяют оценивать условия обеспечения линейности указанных зависимостей при различных подключениях датчиков-преобразователей.

Использование мостовых схем включения тензорезисторов даёт возможность выделять при испытаниях напряжения от действия нормальных сил, а также от действия вертикальных и горизонтальных изгибающих моментов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування [Текст]. – Чинні від 2010-03-01. – К. : Мін регіон буд. України, 2009. – 42 с.
2. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Текст]. – Чинні від 2010-03-01. – К. : Мін регіон буд. України, 2009. – 66 с.
3. Почтовик, Г. Я. Методы и средства испытания строительных конструкций [Текст] / Г. Я. Почтовик, А. Б. Злочевский, А. И. Яковлев. – М. : Высшая школа, 1973. – 160 с.
4. Панфилов, В. А. Электрические измерения [Текст] / В. А. Панфилов. – 3-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
5. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений [Текст] / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
6. Касаткин, А. С. Электротехника [Текст] / А. С. Касаткин. – М. : Энергия, 1973. – 560 с.
7. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки. Том 1. [Текст] / О. М. Костін, О. Г. Шейкина. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – 336 с.

В. П. ТАРАСЕНКО<sup>1\*</sup>, В. Л. РИКИНА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (0562) 33 58 12, ел. пошта vikptaras@mail.ru

<sup>2</sup> ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (0562) 33 58 12

## ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ МОСТІВ ТА ІНШИХ СПОРУД

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Мета.** У зв'язку з впровадженням нових конструкцій мостів та інших споруд актуальним є використання при їх випробуваннях електричних методів вимірювань, при яких вимірювані прогини, напруги і коливання за допомогою датчиків-перетворювачів перетворюються на електричні сигнали. При цьому дуже важливим є забезпечення фазочутливості і пропорційності між вимірюваними механічними величинами і електричними сигналами. **Методика.** При електричних вимірюваннях датчики-перетворювачі підключаються до електричних мереж мостового типу. Розрахунки моста Уїтстона при різних підключених датчиків-перетворювачів виконувались на основі законів Кірхгофа для розгалужених електричних мереж і з використанням перетворення електричної схеми, при якому у вихідній схемі моста Уїтстона група опорів замінюється іншою еквівалентною групою опорів. Розрахунки проведені для випадків наявності і відсутності внутрішнього опору джерела живлення моста при підключенні датчиків-перетворювачів в одне, два і чотири плеча моста Уїтстона. **Результати.** На основі виконаних розрахунків отримані таблиці і графіки функцій  $f_i(\alpha)$  і  $f_{0i}(\alpha)$ , що визначають зміну струму в вимірювальній діагоналі моста Уїтстона, де  $\alpha$  – відносна зміна опорів датчиків-перетворювачів. При одному активному датчику функції  $f_1(\alpha)$  і  $f_{01}(\alpha)$  характеризуються великою нелінійністю, але для тензорезисторів при  $\alpha = \pm(0,01\dots0,02)$  прийнятна лінійність і точність вимірювань забезпечуються. **Наукова новизна.** На основі аналізу результатів проведених розрахунків встановлено залежності величини струму у вимірювальній діагоналі моста Уїтстона при різних схемах підключення датчиків-перетворювачів для вимірювання при випробуваннях напружено-деформованого стану в елементах конструкцій. Враховується також величина внутрішнього опору елементів живлення мостової електричної схеми. Розрахунки виконані з використанням законів Кірхгофа і шляхом еквівалентного перетворення розгалуженої електричної мережі. **Практична значимість.** Отримані в роботі графіки функцій  $f_i(\alpha)$  і  $f_{0i}(\alpha)$  і наведена таблиця дозволяють оцінювати умови забезпечення лінійності зазначених залежностей при різних підключених датчиків-перетворювачів. Мостові схеми включення тензорезисторів дають можливість виділяти при випробуваннях напруги в елементах конструкцій від дії нормальних сил, а також від вертикальних і горизонтальних згинальних моментів.

**Ключові слова:** статичні і динамічні випробування; тензорезистори; датчики-перетворювачі; електричні методи вимірювання; електричні мережі; міст Уїтстона; розрахунок електричних мереж; закони Кірхгофа; метод перетворення схеми; активні та компенсаційні тензорезистори; підключення тензорезисторів

VIKTOR TARASENKO<sup>1\*</sup>, VERA RYKINA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Industry Research Laboratory of artificial structures, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (0562) 33 58 12, e-mail vikptaras@mail.ru

<sup>2</sup> Industry Research Laboratory of artificial structures, Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (0562) 33 58 12

## USING OF ELECTRICAL METHODS OF MEASUREMENTS FOR TESTING OF BRIDGES AND OTHER STRUCTURES

**Purpose.** With the introduction of new designs of bridges and other structures the using of electrical measurement techniques in which the measured deflections, stresses and vibrations, using transmitters, are converted into electrical signals in their testing is of current interest. It is very important to ensure a phase-sensitivity and proportionality between the measured values of mechanical and electrical signals. **Methods.** For electrical measurements transducers are connected to electrical bridge-type circuits. Calculations of the Wheatstone's bridge connections for various transducers were made on the basis of Kirchhoff's laws for branched electrical networks and using circuitry transformation for which in the original scheme of the Wheatstone's bridge the group of resistances is replaced by another, equivalent resistances group. Calculations were performed for the cases of presence and absence of internal resistance of the bridge's power supply with connecting of transducers into one, two and four arms of a Wheatstone's bridge. **Findings.** From the calculations the tables and graphs of the functions  $f_i(\alpha)$  and  $f_{0i}(\alpha)$ , that determine the change of current in the measuring diagonal of a Wheatstone's bridge are derived, where  $\alpha$  is relative change in resistance of transducers. For one active sensor functions  $f_1(\alpha)$  and  $f_{01}(\alpha)$  are characterized by a high non-linearity, but for strain gages at  $\alpha = \pm(0,01\dots0,02)$ , acceptable linearity and accuracy of the measurements are provided. **Originality.** Based on the result analyses for calculations conducted, relations of

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

---

the current in the measuring diagonal of the Wheatstone's bridge are determined for various connecting circuits of transducers for measurement of the stress-strain state in structural elements during tests. Also the value of the internal resistance of the bridge's power supply is taken into account. Calculations were performed using Kirchhoff's laws and by equivalent transformation of branched circuit. **Practical value.** Obtained plots for functions  $f_i(\alpha)$  and  $f_{0i}(\alpha)$  and the above table allow to estimate the conditions for ensuring the linearity of derived dependencies for different transducers' connections. Bridge-type circuits for insertion of strain gages allow to distinguish stresses in structural elements from the action of normal forces as well as vertical and horizontal bending moments.

*Keywords:* static and dynamic tests; strain gages; transducers; electrical measurement techniques; electrical networks; Wheatstone's bridge; the calculation of electrical networks; Kirchhoff laws; method of circuit transformation; active and compensational strain gages; strain gages connections

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна).*

Надійшла до редколегії 20.11.2013.

Прийнята до друку 30.11.2013.