

М. Л. КОРОТЕНКО, Р. Б. ГРАНОВСКИЙ, С. А. КОСТРИЦА, А. В. СУЛТАН,  
В. В. ГЛУХОВ, И. В. КЛИМЕНКО, Н. Я. ГАРКАВИ, Е. Ф. ФЕДОРОВ,  
В. В. КАРПЕНКО (ДИИТ)

## ПРИМЕРЫ КАЗУСОВ, ПРОИЗОШЕДШИХ ПРИ ПОСТАНОВКЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ И ОБРАБОТКЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наведено приклади, у яких первинні висновки про характеристики випробуваних об'єктів через використання зайво ідеалізованих моделей були помилковими.

Приведены примеры, в которых первоначальные выводы о характеристиках испытуемых объектов из-за использования излишне идеализированных моделей были ошибочными.

There are presented some examples where the primary conclusions on features of the objects tested were wrong because of using the unwarranted idealized models.

Как правило, натурный эксперимент имеет целью подтвердить или опровергнуть какую-либо гипотезу, которая «сформулирована» на основе анализа эксплуатационных данных испытуемого изделия (возможно, изделия, аналогичного испытуемому) или на основе численного эксперимента, использующего некоторую идеализированную модель исследуемого процесса. Другими словами, обычно испытатель в натуральных испытаниях имеет дело не с «чёрным ящиком».

Ошибки в испытаниях появляются при неудачном планировании испытаний, при ошибочных или недостаточно точных измерениях, при неправильной обработке результатов испытаний.

Очевидный недостаток квалификации испытателя, использование непригодных к измерениям или недостаточно точных для конкретных измерений датчиков и аппаратуры в данной статье рассматриваться не будет. Кроме того, существует нормативная литература, обобщающая многолетний опыт испытателей и ориентированная на «типичный» подвижной состав и «типичную» его эксплуатацию.

Между тем, в модели, на которую ориентируется испытатель, могли не быть учтены какие-либо достаточно важные свойства испытуемого объекта либо часть аргументов исследуемого процесса. Более того, система измерений, построенная на основе идеализированной модели, может оказаться непригодной к регистрации в натурном эксперименте необходимой для дальнейшего анализа информации.

Ниже приведены 3 примера, когда у испытателей возникли определённые трудности при проведении испытаний или при обработке результатов испытаний.

**Пример 1.** Трудности в данном случае возникли, потому что испытатель ориентировался на излишне идеализированную модель исследуемого процесса (аргументов в математической модели меньше, чем у реального процесса).

Пусть скорость поступательного движения железнодорожного экипажа –  $v$ . Как известно [1, 2], колёсная пара из-за конусности железнодорожных колёс склонна к извилистому движению в рельсовой колее. При этом до определённой скорости в прямом участке пути влияние тележки, спровоцированное, например, стыковыми неровностями пути, имеет тенденцию к затуханию (рис. 1, где  $\psi$  — угол между продольными осями кузова и тележки). При возрастании скорости спровоцированное стыковыми неровностями влияние со значительными амплитудами угловых колебаний не затухает достаточно долго (рис. 2). При скорости  $v_k$  влияние с большими амплитудами угловых колебаний практически не затухает (рис. 3). При скорости, превышающей  $v_k$ , значительно возрастают горизонтальные поперечные силы, приложенные к оси колёсной пары (при этой скорости заметно возрастают и не приведенные на рис. 4 амплитудные значения коэффициентов вертикальной динамики I степени подвешивания). При дальнейшем возрастании скорости возможен сход из-за всползания колеса на головку рельса. Казалось бы, несложно экспериментально определить величину скорости  $v_k$  для конкретного экипажа. Между тем, скорость  $v_k$  в сухую погоду и в дождь (из-за разного трения в контакте колеса и рельса), а также на прямом участке пути и в кривой (из-за появления поперечной силы в контакте колеса и рель-

са – рис. 5) у одного и того же экипажа окажется существенно различной. В подтверждение предыдущего тезиса отметим, что у одного и того же порожнего грузового вагона на изношенных колесах на одном и том же прямом участке пути наибольшие с доверительной вероятностью 0,999 поперечные силы при скорости  $v \approx 70 \pm 7,5$  км/ч в сухую погоду  $|H_p| = 16,5$  кН, а в дождь  $|H_p| = 11,5$  кН. Отметим, что у локомотива с расположенной между кузовом и тележкой толкающей наклонной тягой критическая скорость в режиме тяги и на выбеге тоже окажется различной.

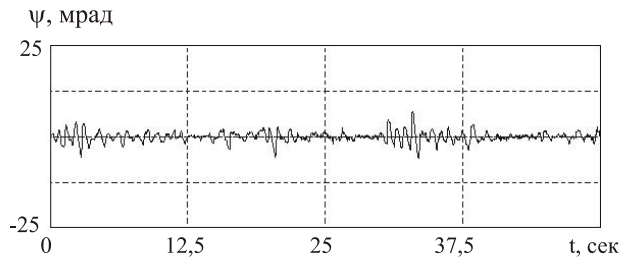


Рис. 1. При скоростях  $v \ll v_k$  колебания виляния, спровоцированные стыковыми неровностями, имеют малую амплитуду и быстро затухают

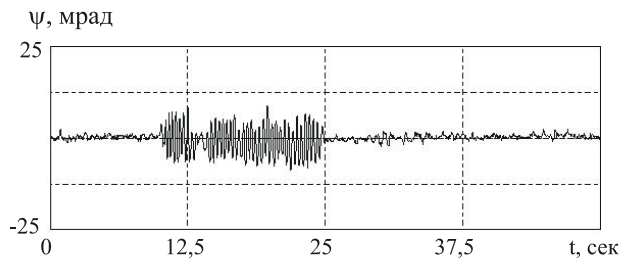
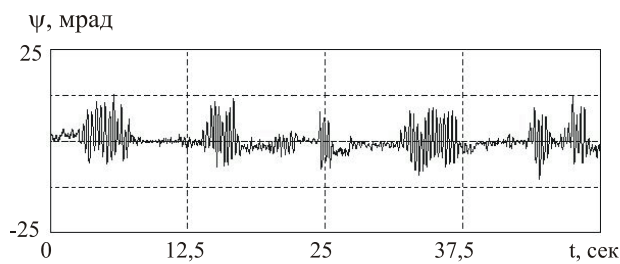


Рис. 2. При скоростях  $v < v_k$ , но с приближением к  $v_k$  спровоцированные стыковыми неровностями виляния не затухают достаточно долго

Таким образом, если не ввести в модель извилистого движения тележки такие аргументы как погода и (для локомотива с наклонной тягой) режим ведения локомотива, результаты испытаний могут оказаться весьма противоречивыми, а при эксплуатации результаты испытаний могут не подтвердиться. Более того, основываясь на выводах, построенных по результатам испытаний в дождь, можно спровоцировать аварию при эксплуатации испытанного подвижного состава в сухую погоду...

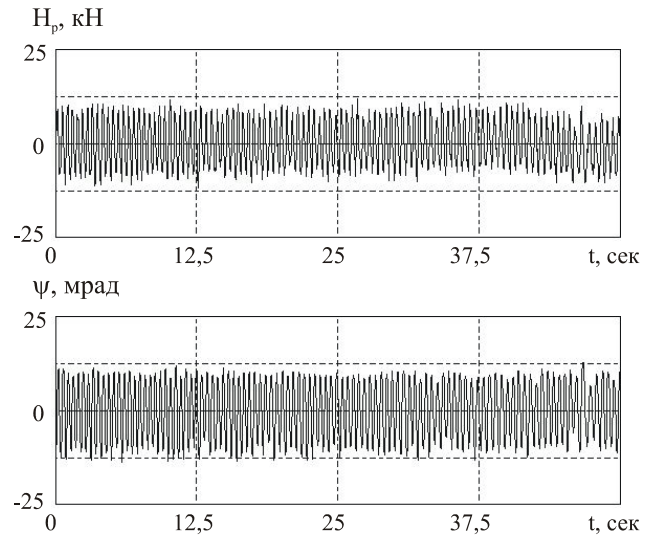


Рис. 3. При скорости  $v = v_k$  виляния со значительными амплитудами не затухают, но поперечные силы небольшие

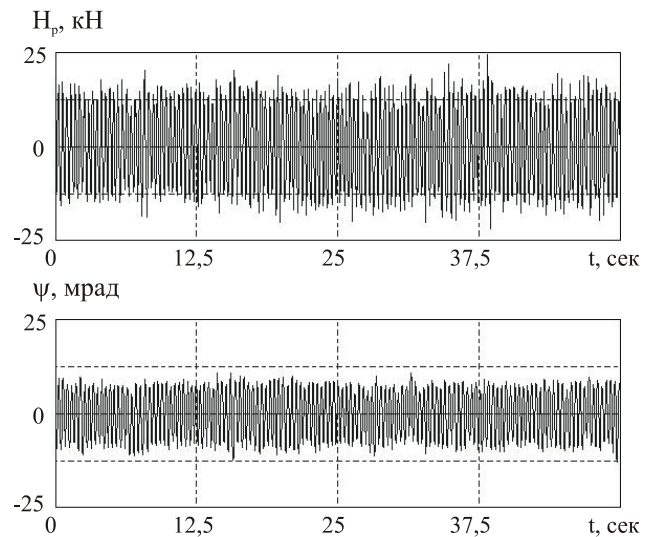


Рис. 4. При скоростях  $v > v_k$  поперечные силы возрастают значительно

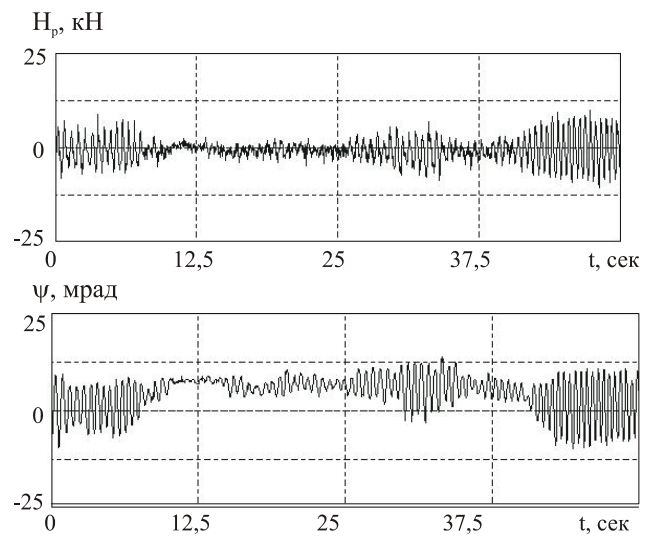


Рис. 5. При  $v = v_k$  в кривой виляния прекращается

**Пример 2.** Ошибки в данном примере связаны с тем, что у испытателя не было достаточно подробной модели динамического нагружения деталей подвижного состава.

Как известно [3], для циклического растяжения-сжатия и для циклического изгиба нормируется предел усталости  $\sigma_{-1}$  ( $\sigma_{-1}$  для циклического растяжения-сжатия несколько отличается от  $\sigma_{-1}$  для циклического изгиба), а для циклического кручения нормируется  $\tau_{-1}$ .

При помощи тензодатчиков можно померить напряжения, но не тип нагружения, например, невозможно определить, имело ли место циклическое растяжение-сжатие по нескольким осям одновременно или повторяющиеся (возможно, попеременно) изгиб и кручение. При помощи трёхэлементной розетки деформаций несложно зарегистрировать нормальные и касательные напряжения в плоскости розетки, а по ним определить расположенную не в плоскости розетки площадку, в которой имеет место наибольшая усталостная наработка по нормальным напряжениям [4 – 6]. Между тем, хотя при помощи датчиков будут зафиксированы примерно одинаковые усталостные наработки, при наличии циклического кручения трещины в детали появятся значительно раньше, чем при циклическом растяжении-сжатии или изгибе [5]. Иногда только по направлению усталостных трещин удастся определить присутствие в нагружении циклического кручения, что позволяет объяснить «слишком раннее» разрушение детали.

На рис. 6 приведена схема циклического изгибного нагружения вращающегося вала. Здесь 1 – двигатель, 2 – вращающийся вал непостоянного сечения, 3 – подшипник, 4 – элементы станины,  $F$  — вертикальная сила (подвешенный на вал груз). На рис. 7 приведена фотография усталостного излома вала циклическим изгибным нагружением, соответствующим рис. 6. Излом практически перпендикулярен оси детали.

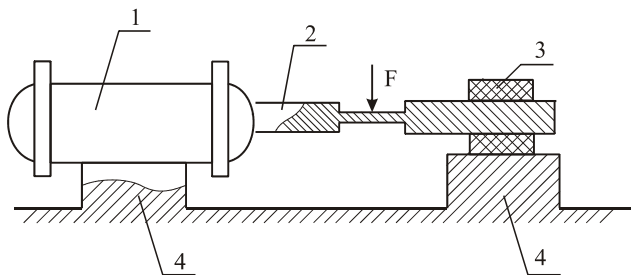


Рис. 6. Схема циклического изгибного нагружения вращающегося вала



Рис. 7. Усталостное разрушение вала циклическим изгибным нагружением

На рис. 8, 9 приведены фотографии усталостных разрушений валов совместными и попеременными циклическими изгибным и крутильным нагружениями. Усталостные трещины – продольные или преимущественно продольные.

### Пояснения к сказанному выше

Как известно [7], под усталостью понимают процесс постепенного накопления повреждений материала при действии повторно-переменных (циклических) напряжений, не достигающих предела прочности. Усталость металлов проявляется в возникновении и развитии трещин. При этом задолго до появления трещин усталости в металле накапливаются необратимые изменения. Поскольку завершающий этап усталостного разрушения напоминает по внешнему виду хрупкое разрушение [7], то чаще всего считают, что усталость металла определяется только нормальными напряжениями.

Свободная плоская поверхность несущей конструкции испытывает плоское напряженное и трехмерное деформированное состояние. Тензоры напряжений и деформаций в случае плоского напряженного состояния соответственно:

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{x,y}/2 & 0 \\ \gamma_{x,y}/2 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}.$$

Поскольку [7] напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{x,y} = \tau$  от деформации  $\varepsilon_z$  не зависят, для регистрации плоского напряженного состояния используется розетка деформаций.

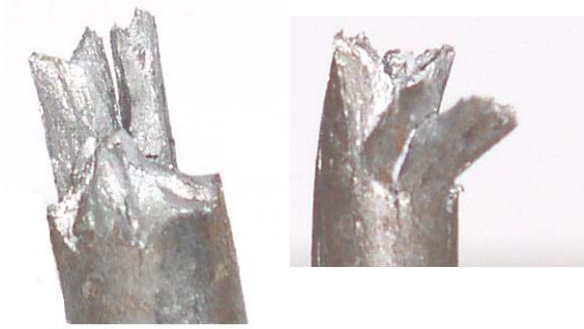


Рис. 8. Усталостное разрушение образца из низколегированной стали чередующимися циклическими изгибным и крутильным нагружениями. Трещины преимущественно продольные



Рис. 9. Усталостное разрушение образца циклическим изгибно-крутильным нагружением. Трещины продольные

В ходовых испытаниях железнодорожных вагонов трёхэлементной розеткой деформаций регистрируются процессы  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  и  $x_3(t)$ . При этом обычно  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  регистрируются тензодатчиками, ориентированными во взаимно перпендикулярных направлениях, а  $x_3(t)$  регистрируется тензодатчиком, ориентированным вдоль биссектрисы угла между направлениями измерения  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ . Динамические добавки деформаций регистрируются, безусловно, правильно. Нулевые уровни деформаций медленно смещаются относительно своего первоначального положения (в том числе и вследствие дрейфа нулей тензоусилителей). Для компенсации дрейфа нулей процессы  $\bigvee_{i=1}^3 x_i(t)$  необходимо центрировать. Для центрирования при прохождении испытательным поездом прямых участков пути определяются средние значения [8] процессов  $\bigvee_{i=1}^3 x_i(t)$ :

$$m_i = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) dt .$$

Центрирование в прямых участках пути заключается в вычитании из  $x_i(t)$  величины  $m_i$ , соответствующей данному участку, а центрирование в кривых участках пути и при прохождении стрелок – в вычитании величины  $m_i$ , зарегистрированной в ближайшей к данному участку прямой. Символом  $T$  обозначена длительность процесса  $x_i(t)$  (время прохождения испытательным сцепом данного прямого участка пути). Значение деформации  $\varepsilon_i(t)$  смещено относительно центрированного процесса  $(x_i(t) - m_i)$  на статическую составляющую деформации  $X_{ст,i}$ :

$$\bigvee_{i=1}^3 \varepsilon_i(t) = x_i(t) - m_i + X_{ст,i} .$$

Обычно значение  $X_{ст,i}$  определяется расчетным путем. Иногда (например, в случае одноосного растяжения или сжатия) удается определить значение  $X_{ст,i}$  прямыми или косвенными измерениями.

Нормальные и касательные напряжения плоского напряженного состояния в плоскости розетки определяются согласно зависимостям [7, 9]:

$$\sigma_x(t) = A \cdot (\varepsilon_1(t) + \mu \cdot \varepsilon_2(t)) ;$$

$$\sigma_y(t) = A \cdot (\varepsilon_2(t) + \mu \cdot \varepsilon_1(t)) ,$$

$$\tau(t) = B \cdot (2 \cdot \varepsilon_3(t) - \varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t)) ,$$

где  $A = E / (1 - \mu^2)$ ;  $B = 0,5 \cdot E / (1 + \mu)$ ;  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Нормальные и касательные напряжения ( $\sigma_v$  и  $\tau_v$ ) в площадках, определяемых перпендикулярным к этим площадкам вектором

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \cos(v, x) \\ \cos(v, y) \\ \cos(v, z) \end{bmatrix} , \text{ определяются зависимостями [9]:}$$

$$\sigma_v(t) = \vec{v}' \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \vec{v} =$$

$$= \sigma_x(t) \cdot \cos^2(v, x) + \sigma_y(t) \cdot \cos^2(v, y) +$$

$$+ 2 \cdot \tau_{x,y}(t) \cdot \cos(v, x) \cdot \cos(v, y) ;$$

$$\bar{\tau}_v(t) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{x,y} & 0 \\ \tau_{x,y} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \bar{v} - \sigma_v(t) \cdot \bar{v}.$$

Здесь  $\bar{v}'$  – матрица-строка (транспонированная матрица-столбец  $\bar{v}$ );  $(v, x)$  и  $(v, y)$  – углы между вектором  $\bar{v}$  и положительными направлениями осей датчиков, фиксирующих процессы  $\varepsilon_1(t)$  и  $\varepsilon_2(t)$ ,  $(v, z)$  – угол между вектором  $\bar{v}$  и перпендикуляром к плоскости розетки [8, 10], нормальное напряжение  $\sigma_v$  – скаляр, касательное напряжение  $\bar{\tau}_v$  – вектор;

$$\cos^2(v, x) + \cos^2(v, y) + \cos^2(v, z) = 1.$$

Для оценки усталостной прочности деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей достаточно часто [9, 11, 12] предлагается пользоваться кривой Велера, которая строится в предположении, что

$$\sum_k \sigma_k^m \cdot N_k = \sigma_{-1}^m \cdot N_0 = \text{const},$$

где  $\sigma_k$  – напряжение, соответствующее классу  $k$  [13] (интервалу напряжений

$$[\sigma_k - \Delta K / 2; \sigma_k + \Delta K / 2),$$

где  $\Delta K$  – ширина класса; обычно  $\Delta K = 2$  МПа или  $\Delta K = 4$  МПа) [4],  $N_k$  – количество приведенных к симметричным полным циклам колебаний напряжения [12, 13] класса  $k$  [13] (приведенных к размаху  $(-\sigma_k) \leq \sigma \leq (+\sigma_k)$ ),  $\sigma_{-1}$  – предел усталости по нормальным напряжениям при изгибе,  $\sum_k N_k$  – количество полных циклов

изменения напряжения (всех классов) до полного разрушения,  $N_0$  – базовое количество полных циклов изменения напряжения (размаха  $(-\sigma_{-1}) \leq \sigma \leq (+\sigma_{-1})$ ) до полного разрушения; показатель степени  $m$  в [9] называется параметром циклической трещиностойкости металла. Для сварных и литых рам и балок в зависимости от материала Нормы [1] предлагают принимать:  $m \approx 4$  для малоуглеродистых сталей,  $m \approx 4,5$  для низколегированных сталей.

Приведение цикла напряжений к симметричному осуществляется следующим образом. После «выделения экстремумов» реализация  $\sigma_v(t)$  схематизируется по методу «дождя» [12, 13]. При этом из реализации последовательно выделяются размахи полуциклов  $2X_a$  (полуразмах – «амплитуда») – полуцикла:  $X_a$ ) и

средние значения в полуциклах  $X_M$ , после чего асимметричные циклы нагружения приводятся к эквивалентным симметричным [13]:

$$X_{\text{пр}} = \begin{cases} X_a + \psi X_M & \leftarrow X_M > 0; \\ X_a & \leftarrow X_M \leq 0. \end{cases}$$

Согласно [14], коэффициент асимметрии цикла нагружения определяется выражением

$$\psi = (0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_b) / K_K.$$

Здесь  $\sigma_b$  – предел прочности, измеряемый в МПа. Коэффициент  $K_K$ , учитывающий влияние концентрации напряжений, нормируется в [1]. Если предел усталостной прочности детали ( $\sigma_{-1}/K_K$ ) известен, то для легированных сталей согласно [14] допускается определять коэффициент асимметрии цикла нагружения из выражения  $\psi = (\sigma_{-1}/K_K) / (2\sigma_b - (\sigma_{-1}/K_K))$ . Здесь  $\sigma_{-1}$  измеряется в МПа.

Пробег до разрушения  $S$  км по изложенной методике определяется следующим образом. На участке длиной  $L_j$  определяется усталостная наработка  $\sum_k \sigma_k^m \cdot N_k^{(j)}$ , где  $N_k^{(j)}$  – количество

приведенных к симметричным полным циклам колебаний напряжения класса  $k$  на

участке  $L_j$ . Тогда  $S = \frac{\sigma_{-1}^m \cdot N_0 \cdot L_j}{(n \cdot K_K)^m \cdot \sum_k \sigma_k^m \cdot N_k^{(j)}}$ ,

где  $n$  – коэффициент запаса [1],  $K_K$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений [1].

**Пример 3.** В данном примере испытатели при проектировании измерительной аппаратуры ориентировались на модель грузового железнодорожного вагона, которая, как выяснилось, была излишне идеализированной.

Измерение вертикальных усилий тензодатчиками, расположенными на боковине тележки грузового вагона, при неразмагниченных после магнитной дефектоскопии колесах приводит к появлению наводки  $e(t)$  синусоидальной формы, частота и амплитуда которой прямо пропорциональны скорости движения вагона.

Запитать тензомосты (измерительную часть тензостанции) можно постоянным напряжением (рис. 10), как в аппаратуре ТМА-32 [15], или переменным (рис. 11), как в аппаратуре 8АНЧ [16]. На обоих рисунках  $u$  – питание тензомоста,  $u_{\text{вых}}$  – выходное напряжение измеритель-

ной схемы,  $R_1$  — компенсационный тензорезистор,  $R_2$  — измерительный тензорезистор,  $R_0$  и  $R_{01}$  — вспомогательные резисторы.

При питании тензомоста постоянным напряжением после балансировки

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{u \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{u \cdot R_{01}}{R_{01} + R_0} = 0.$$

При измерении растяжения/сжатия элемента нагружаемой детали сопротивление резистора  $R_2$  становится  $R_2 + \Delta R$ , а выходное напряжение тензомоста

$$\begin{aligned} u_{\text{ВЫХ}} &= \frac{u \cdot (R_2 + \Delta R)}{R_1 + R_2 + \Delta R} - \frac{u \cdot R_{01}}{R_{01} + R_0} = \\ &= u \cdot \left( \frac{R_2 \cdot (R_{01} + R_0) - R_{01} \cdot (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2 + \Delta R) \cdot (R_{01} + R_0)} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\Delta R \cdot (R_{01} + R_0) - \Delta R \cdot R_{01}}{(R_1 + R_2 + \Delta R) \cdot (R_{01} + R_0)} \right) \approx \\ &\approx \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)}. \end{aligned}$$

При наличии помехи  $e(t)$ , включённой последовательно с сопротивлением  $R_2$  (рис. 12), выходное напряжение тензомоста

$$\begin{aligned} u_{\text{ВЫХ}} &= \frac{u \cdot (R_2 + \Delta R)}{R_1 + R_2 + \Delta R} + e(t) - \frac{u \cdot R_{01}}{R_{01} + R_0} \approx \\ &\approx \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)} + e(t). \end{aligned}$$

Таким образом, если

$$e(t) \gg \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)},$$

наводка может маскировать измеряемый сигнал. Что и наблюдалось во время испытаний грузовых вагонов с неразмагниченными после магнитной дефектоскопии колесами при использовании для измерений тензостанции ТМА-32.

При питании тензомоста переменным напряжением после балансировки, как и в предыдущем случае,  $u_{\text{ВЫХ}} = 0$ . При измерении растяжения/сжатия элемента нагружаемой детали сопротивление резистора  $R_2$  становится  $R_2 + \Delta R$ , а выходное напряжение трансформатора

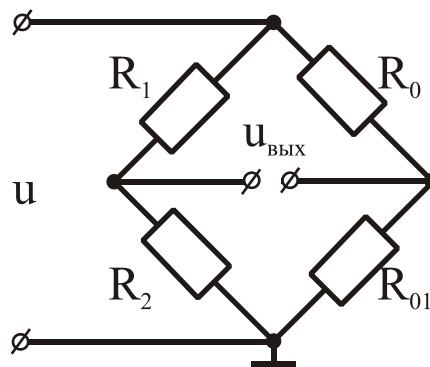


Рис. 10. Мостовая схема тензоизмерений с питанием постоянным напряжением

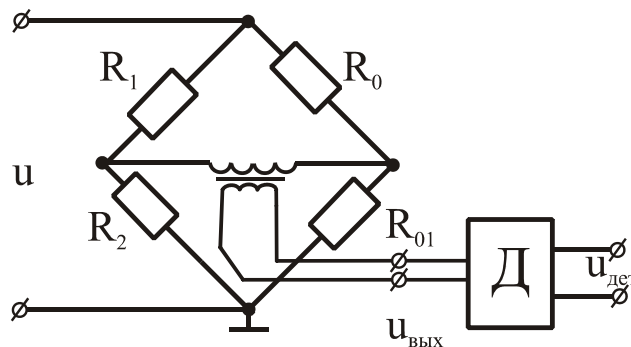


Рис. 11. Мостовая схема тензоизмерений с питанием переменным напряжением. Д — детектирующее устройство

$$u_{\text{ВЫХ}} \approx k_{\omega} \cdot \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)}.$$

Здесь  $k_{\omega}$  — коэффициент трансформации на несущей частоте  $\omega$ . При наличии помехи  $e(t)$ , включённой последовательно с сопротивлением  $R_2$ , выходное напряжение трансформатора

$$u_{\text{ВЫХ}} \approx k_{\omega} \cdot \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)} + k_e \cdot e(t).$$

При достаточно большом  $k_{\omega}$ , если  $\omega$  значительно больше частоты синусоиды сигнала  $e(t)$ , а следовательно и  $k_{\omega} \gg k_e$ , выходное напряжение трансформатора (до детектирования)

$$u_{\text{ВЫХ}} \approx k_{\omega} \cdot \frac{u \cdot \Delta R \cdot R_0}{(R_1 + R_2) \cdot (R_{01} + R_0)}.$$

Таким образом, если бы для измерений в описанных выше испытаниях использовалась аппаратура 8АНЧ, а не ТМА-32, маскирования измеряемого сигнала не наблюдалось бы.

## Выводы

1. Из-за излишней идеализации модели на вопрос, поставленный после численного экспе-

римента, иногда невозможно ответить в натуральных испытаниях.

2. Без достаточно глубокого предварительного анализа на модели иногда после натуральных испытаний не удастся ответить на поставленный испытателю вопрос.

3. Если в модель исследуемого процесса не был введен один из аргументов реального процесса, то, ориентируясь на результаты численного эксперимента, возможно, не удастся даже произвести измерения в натуральных испытаниях.

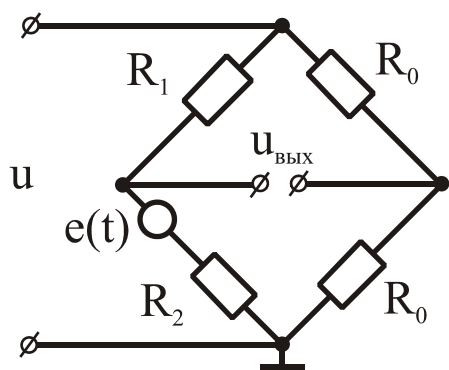


Рис. 12. Схема измерения, учитывающая помеху (наводку от магнитного колеса)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. [Текст, CD-ROM] / У. Дж. Харрис [и др.] – 1-е изд. – США: Межд. ассоциация тяжеловесного движения, 2808 Форест-Хилл-корт, Виргиния-Бич, шт. Виргиния, 23454 США / Издание на рус. яз. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
3. Справочник машиностроителя [Текст]. – Т. 3 / Е. А. Чудаков – председатель ред. совета; под ред. С. В. Серенсена и Н. С. Ачеркана. – М.: Гос. науч.-тех. изд-во машиностроительной лит-ры, 1951. – 1098 с.
4. Определение по результатам ходовых испытаний усталостной прочности несущих конструкций железнодорожных вагонов [Текст] / Е. П. Блохин [и др.] // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 8. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2005. – С. 26-34.

5. К вопросу об оценке усталостной прочности деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей при циклическом нагружении [Текст] / Е. П. Блохин [и др.] // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 119-127.
6. Механика разрушения и прочность материалов [Текст] : справ. пособие / О. Н. Романив [и др.] – Т. 4. Усталостная и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
7. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст] : справ. пособие / Б. С. Касаткин [и др.] – К.: Наук. думка, 1981. – 584 с.
8. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
9. Гусев, А. С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках [Текст] / А. С. Гусев. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
10. Справочник машиностроителя [Текст] / под ред. Е. А. Чудакова. – Т. 1. – М.: Гос. науч.-тех. изд-во машиностроительной лит-ры, 1951. – 1036 с.
11. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества [Текст] : Введ. в действие 01.07.1996. – М.: ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
12. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
13. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов [Текст].
14. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости [Текст].
15. 32-канальная тензометрическая аппаратура. Техническое описание и инструкция по обслуживанию [Текст]. – 2004. – 32 с.
16. Аппаратура тензометрическая на несущей частоте 8АНЧ-23. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 9А2.782.003 ТО [Текст]. – 1989. – 133 с.

Поступила в редколлегию 21.06.2010.  
Принята к печати 29.06.2010.