

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВОГО АНКЕРНОГО СООРУЖЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Н. И. БУРАУ<sup>1</sup>, Э. В. КУЛИШ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: buray@pson.ntu-kpi.kiev.ua

<sup>2</sup>ООО «Центр научно-технических услуг «Инжзахист». г. Ялта, ул. Кирова, 81.

Для определения функционального технического состояния противооползневого анкерного сооружения по результатам вибрационной диагностики предложено провести оценку параметра, характеризующего изменение натяжения стержней анкера, с использованием метода максимального правдоподобия. Получены аналитические выражения оценок по двум диагностическим признакам, выполнена оценка параметра, проанализированы статистические характеристики полученных оценок. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 2.

*Ключевые слова:* анкерные сооружения, вибрационная диагностика, натяжение стержней анкера, свайные противооползневые конструкции

Освоение оползнеопасных территорий, как правило, сопровождается угрозой возникновения оползневых смещений грунтов при производстве работ по вертикальной планировке. Для исключения образования неблагоприятных и опасных явлений на склонах предварительно выполняются сооружения инженерной защиты. В настоящее время широко используются как однотипные, так и комбинированные конструкции удерживающих сооружений [1].

Однотипные сооружения представлены свайными конструкциями, располагаемыми в один или несколько рядов, зачастую армированными по верхней грани железобетонными балками, каркасами или плитами, которые могут одновременно являться основанием для зданий и сооружений. Также к однотипным удерживающим сооружениям относятся стены с анкерным креплением к ним железобетонных плит, которые также для придания дополнительной жесткости конструкции могут армироваться железобетонными балками и каркасами.

Комбинированные удерживающие сооружения проектируются с использованием различных типов конструкций в виде комбинированных свайно-анкерных конструкций, состоящих из одного ряда свай и одного или нескольких рядов анкерных плит, прижимающих сваи или верхнюю часть свайного ростверка к склону. Иногда они выполняются в виде сложных комбинированных ростверков с использованием рядов свай, рядов свай с анкерами и рядов или отдельных плит с анкерным креплением.

Противооползневые и удерживающие сооружения позволяют компенсировать горизонталь-

ные нагрузки от грунтовых масс, возникающие вследствие естественных оползневых нагрузок или от нагрузок, возникающих в результате вертикальной планировки рельефа, обеспечивая нормативный запас устойчивости территории. Но при этом важным является обеспечение надежной и безопасной эксплуатации самих противооползневых сооружений. Своевременная оценка технического состояния (ТС) их элементов конструкции обеспечит поддержание противооползневых сооружений в рабочем состоянии, позволит прогнозировать возможность их дальнейшей эксплуатации или принять решение о необходимом ремонте или реконструкции.

Предыдущие работы авторов [2, 3] были посвящены разработке метода диагностики функционального технического состояния элементов конструкций противооползневых анкерных сооружений. Параметром анкерного сооружения, который характеризует изменение его состояния, является изменение натяжения стержня анкера в процессе его эксплуатации, которое недоступно измерениям. Проведенные исследования дискретных динамических моделей отдельных элементов конструкций и многоанкерных сооружений в целом показали, что выявить изменение натяжения стержня анкера можно по изменению микроперемещений, измеренных на подпорной стенке сооружения, и по изменению собственных частот стержней по первой форме колебаний. Поэтому для диагностики противооползневого анкерного сооружения предложен метод вибрационной диагностики, заключающийся в:

– периодических измерениях перемещений в заданной точке подпорной стенки (в месте установки натяжного устройства);

– периодических измерениях отклика (при ударном воздействии в точке закрепления анкера в подпорной стенке и возбуждении свободных колебаний в стержне анкера) и определении собственной частоты контролируемого стержня;

– принятии решения о натяжении контролируемого стержня по измеренным или определенным диагностическим признакам.

Для последнего этапа целесообразно использовать методы теории оценивания для оценки параметра, который характеризует ТС контролируемого объекта. По значению полученной оценки можно судить не только о текущем состоянии объекта, но и определить начальные изменения состояния, прогнозировать дальнейшее изменение состояния даже в том случае, когда диагностические признаки еще не превысили своих пороговых значений [4].

Целью данной работы является неразрушающее оценивание изменения натяжения стержня анкера противоположного сооружения по изменению собственной частоты стержня по первой форме колебаний и изменению микроперемещений подпорной стенки.

**Метод максимального правдоподобия.** Задача оценивания неизвестного параметра по результатам измерений или наблюдений некоторого процесса согласно теории оценивания содержит следующие четыре элемента [4].

*Пространство параметров.* Выходной величиной какого-либо источника информации является некоторый параметр  $\lambda$  (переменная), который рассматривается как точка в пространстве параметров.

*Вероятностное отображение из пространства параметров в пространство наблюдения.* Это вероятностный закон, который описывает влияние параметра  $\lambda$  на результаты наблюдения.

*Пространство наблюдения.* В классической задаче оценивания это пространство с конечным числом измерений. Точка в этом пространстве обозначается вектором  $\mathbf{R}$ .

*Правило оценивания.* После наблюдения  $\mathbf{R}$  необходимо оценить значение параметра  $\lambda$ , т. е. определить оценку  $\hat{\lambda}(\mathbf{R})$  неизвестного параметра  $\lambda$  по результатам измерений или наблюдений. Процедура отображения пространства наблюдений в оценку называется правилом оценивания.

При описании пространства наблюдения рассматриваются случаи, когда параметр  $\lambda$  является случайной величиной с соответствующей плотностью вероятности, и когда параметр  $\lambda$  – это неизвестная неслучайная величина.

Для оценивания случайных параметров как правило используются байесовские оценки:

– оценка по критерию минимума среднеквадратической ошибки

$$\int_{\Lambda} (\lambda - \hat{\lambda})^2 W_{\text{апс}}(\lambda) d\lambda = \min,$$

где  $\Lambda$  – интервал возможных значений параметра  $\lambda$ ;  $W_{\text{апс}}(\lambda)$  – апостериорная плотность вероятности;

– оценка по критерию максимума апостериорной вероятности, по которому в качестве оценки выбирается тот корень уравнения

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln W_{\text{апс}}(\lambda) = 0,$$

который непосредственно зависит от реализации, в которой содержится информация о параметре  $\lambda$ .

Для оценивания неслучайного параметра наиболее целесообразным является использование метода максимального правдоподобия (ММП). По математическому описанию такая оценка представляет собой предельный случай оценки по критерию максимума апостериорной вероятности, когда количество априорной информации стремится к нулю. Уравнение максимального правдоподобия (УМП) записывается в виде [4–6]:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln L(\lambda) = 0, \quad (1)$$

где  $L(\lambda)$  – функционал правдоподобия.

В общем случае УМП представляет собой нелинейное или трансцендентное уравнение, которое может иметь несколько решений, отвечающих максимумам и минимумам функционала правдоподобия. Все решения уравнения (1) будут оценками максимального правдоподобия неизвестного параметра  $\lambda$  и задача оценивания будет состоять в определении такого решения, которое отвечает максимуму максимому  $L(\lambda)$ . Оценки по максимуму правдоподобия являются асимптотически эффективными, минимальная дисперсия оценок отвечает границе Рао–Крамера и определяет потенциальную точность оценивания. В качестве меры точности оценки принимается дисперсия или среднеквадратическое отклонение полученной оценки от значения оцениваемого параметра:

$$m\{(\hat{\lambda}_n - \lambda)^2\} \geq \sigma_{\hat{\lambda}}^2 \geq [1 + b'_n(\lambda)] / I_n(\lambda),$$

где  $\sigma_{\hat{\lambda}}^2$  – дисперсия оценки;  $m\{\}$  – знак математического ожидания;  $b'_n(\lambda)$  – производная по параметру  $\lambda$  от величины смещения полученной оценки от значения оцениваемого параметра;  $I_n(\lambda)$  – информация по Фишеру, содержащаяся в выборке длиной  $n$  и определяемая выражением:

$$I_n(\lambda) = m\left\{\left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln L(\lambda)\right]^2\right\}.$$

Для разработки правила и алгоритма оценивания изменения натяжения стержней противоположного анкерного сооружения по результатам

вибрационной диагностики будем использовать метод максимального правдоподобия. Для получения аналитических выражений оценок используем результаты модельных экспериментов, полученные в работах [2, 3]. В качестве оцениваемого параметра рассматриваем параметр  $\Delta C$ , который при моделировании использовался для описания уменьшения натяжения стержня анкера. В соответствии с изложенным выше описанием ММП в задаче оценивания обозначим  $\Delta C = \lambda$ .

**Оценивание параметра изменения натяжения стержня анкера по изменению собственной частоты по первой форме колебаний стержня.**

Для оценивания параметра  $\lambda$  по изменению собственной частоты стержня по первой форме колебаний используем данные моделирования многоанкерного противоположного сооружения, приведенные в работе [3] в табл. 4 для  $i = 1$ . График изменения приведенной собственной частоты от оцениваемого параметра приведен на рис. 1, где  $f_0$  – значение собственной частоты по первой форме колебаний для случая закрепленных замков и одинаковой жесткости всех стержней ( $\Delta C = 0$ ),  $f_{1*}$  – значение собственной частоты по первой форме колебаний при уменьшении жесткости одного анкера ( $\Delta C = 0,15; 0,25$ ).

Для аппроксимации приведенной кривой используем полином второго порядка:

$$m_f = \mu_{f0} + \mu_{f1}\lambda + \mu_{f2}\lambda^2, \quad (2)$$

значения коэффициентов полинома:  $\mu_{f0} = 1; \mu_{f1} = -0,42; \mu_{f2} = -9,2$ .

Полагаем, что при проведении вибрационных измерений в реальных условиях действуют неконтролируемые помехи, в результате чего определенные отношения частот  $f_{1*}/f_0$  при  $i$ -м измерении будем считать случайной величиной  $\xi_{if}$  (индекс  $f$  означает, что для диагностики используется частотный признак) с нормальным законом распределения:

$$p(\xi_{if}) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\xi_{if} - m_f)^2}{2\sigma_f^2} \right],$$

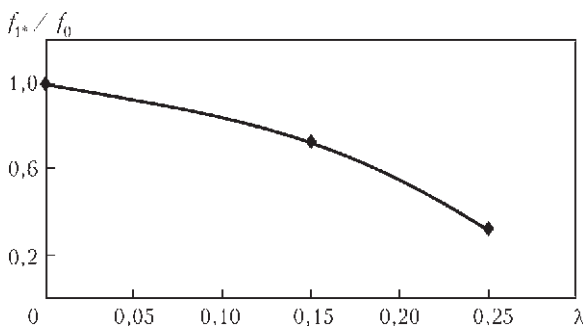


Рис. 1. График зависимости приведенной собственной частоты стержня многоанкерного противоположного сооружения по первой форме колебаний от параметра  $\lambda$

где  $m_f$  – математическое ожидание случайной величины, которое имеет вид (2);  $\sigma_f$  – среднеквадратическое отклонение, которое не зависит от параметра  $\lambda$ .

Запишем функцию правдоподобия для  $i$ -го измерения случайной величины  $\xi_{if}$ :

$$\ln p(\xi_{if}, \lambda) = -\ln \sigma_f - 0,5 \ln 2\pi - \frac{(\xi_{if} - m_f)^2}{2\sigma_f^2},$$

или для случая  $n$  измерений:

$$L(\xi_f, \lambda) = \sum_{i=1}^n \ln p(\xi_{if}, \lambda) = -n(\ln \sigma_f + 0,5 \ln 2\pi) - \frac{1}{2\sigma_f^2} \sum_{i=1}^n (\xi_{if}^2 - 2\xi_{if}m_f + m_f^2). \quad (3)$$

После математических преобразований УМП (1) для функции (3) получим в виде:

$$\frac{1}{\sigma_f^2} \left( nm_f \frac{\partial m_f}{\partial \lambda} - \sum_{i=1}^n \xi_{if} \frac{\partial m_f}{\partial \lambda} \right) = 0. \quad (4)$$

С учетом (2) уравнение (4) преобразуем к виду:

$$\sum_{j=0}^3 M_{fj} \lambda^j = 0, \quad (5)$$

где  $M_{f3} = 2\mu_{f2}^2; M_{f2} = 3\mu_{f1}\mu_{f2};$

$$M_{f1} = 2\mu_{f0}\mu_{f2} + \mu_{f1}^2 - 2\mu_{f2} \sum_{i=1}^n \xi_{if};$$

$$M_{f0} = \mu_{f1}(\mu_{f0} - \sum_{i=1}^n \xi_{if}).$$

Для определения из уравнения (5) оценки параметра  $\lambda$  используем результаты трех модельных экспериментов ( $i = 3$ ). Результаты определения оценок и их статистических характеристик  $m_{\lambda}$  и  $\sigma_{\lambda}$  с учетом измерительного шума приведены в табл. 1.

Как видно из приведенных результатов, среднеквадратическое отклонение полученных оценок имеет один порядок, за исключением случая для  $\lambda = 0,3$ , где существует ограничение метода моделирования.

Для определения качества полученных оценок используем статистический показатель качества оценки  $Q$ , который определяется по формуле [6]:

$$Q(\lambda) = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{m_{\lambda}^2}. \quad (6)$$

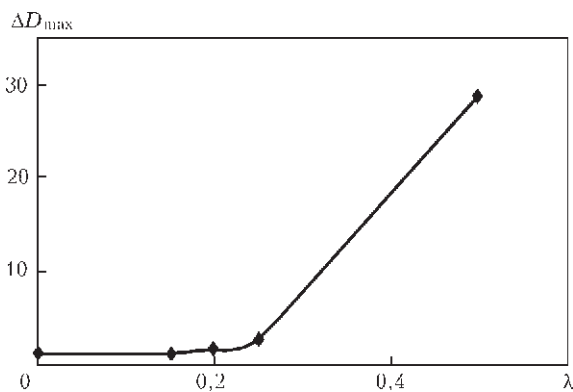
Показатель (6) является обратным отношением сигнал/шум, а значения  $Q \ll 1$  соответствуют устойчивым оценкам. Как видно из приведенных в последних двух строках табл. 1 данных, полученные оценки удовлетворяют требованию статистического качества и являются устойчивыми и эффективными.

Таблица 1. Значения и статистические характеристики оценок параметра  $\lambda$  по частотному признаку

Номер измерения	$\lambda=0,1$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,2$	$\lambda=0,25$	$\lambda=0,3$
$i=1$	0,0999	0,1499	0,2	0,25	0,2999
$i=2$	0,0988	0,1507	0,2006	0,249	0,3073
$i=3$	0,0996	0,1491	0,1993	0,2491	0,2995
$m_{\hat{\lambda}}$	0,0994	0,1499	0,1999	0,2494	0,3022
$\sigma_{\hat{\lambda}}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Значения и статистические характеристики оценок параметра  $\lambda$  по признаку  $\Delta D_{\max}$ 

Номер измерения	$\lambda=0,1$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,2$	$\lambda=0,25$	$\lambda=0,3$
$i=1$	0,1717	0,1987	0,1998	0,249	0,2999
$i=2$	0,1719	0,1979	0,2	0,2489	0,3
$i=3$	0,1718	0,1990	0,2	0,2494	0,3
$m_{\hat{\lambda}}$	0,1718	0,1985	0,1999	0,2491	0,29996
$\sigma_{\hat{\lambda}}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$

Рис. 2. График зависимости относительного перемещения подпорной стенки многоанкерного противооползневого сооружения от параметра  $\lambda$ 

**Оценивание параметра изменения натяжения стержня анкера по изменению микроперемещений подпорной стенки.** Для оценивания параметра  $\lambda$  по данному признаку используем приведенные в работе [2] в табл. 3 результаты изменения относительного значения максимального перемещения  $\Delta D_{\max}$  подпорной стенки в зависимости от значения параметра, характеризующего изменение натяжения стержня анкера. График зависимости данного признака от оцениваемого параметра представлен на рис. 2.

Как и в предыдущем случае, для данной аппроксимации кривой используем полином второго порядка от параметра  $\lambda$ :

$$m_{\Delta D} = \mu_{\Delta D0} + \mu_{\Delta D1} \lambda + \mu_{\Delta D2} \lambda^2, \quad (7)$$

значения коэффициентов полинома:  $\mu_{\Delta D0} = 1$ ;  $\mu_{\Delta D1} = -42,56$ ;  $\mu_{\Delta D2} = 196,8$ .

Так как полином (7) имеет такой же порядок, как и (2), воспользуемся полученными выше аналитическими выражениями (3)–(5) для определения оценки параметра  $\lambda$  по данному диагностическому признаку. Результаты определения оценок и их статистических характеристик приведены в табл. 2.

Как видно из полученных результатов, значения дисперсии оценок находятся практически в одном диапазоне. Определение статистического показателя качества полученных оценок по выражению (6) и его анализ показал, что оценивание параметра  $\lambda$  по изменению перемещений подпорной стенки является эффективным и устойчивым, так как во всем рассматриваемом диапазоне значений  $\lambda$  статистический показатель качества  $Q \ll 1$ .

### Выводы

Для диагностики противооползневого анкерного сооружения предложен метод вибрационной диагностики, который позволяет определить изменение натяжения стержня анкера по изменению микроперемещений, измеренных на подпорной стенке сооружения, и по изменению собственных частот стержней по первой форме колебаний.

Разработано правило и алгоритм оценивания изменения натяжения стержней противооползневого анкерного сооружения по результатам вибрационной диагностики с использованием метода максимального правдоподобия. Выполнено оценивание параметра изменения натяжения стержня анкера многоанкерного сооружения, определены статистические характеристики полученных оценок, анализ которых показал эффективность и устойчивость оценок по статистическому показателю качества.

Полученные оценки изменения натяжения стержней целесообразно использовать для определения текущего функционального технического состояния стержней и прогнозирования изменения их состояния в процессе эксплуатации противооползневых анкерных сооружений.

1. Билеуш А. И. Оползни и противооползневые мероприятия. – Киев: Наук. думка, 2009. – 560 с.
2. Бурау Н. И., Кльофа Ю. В., Кулиш Э. В. Разработка метода диагностики функционального технического состояния элементов конструкций противооползневых

- анкерных сооружений. Сообщение 1. Анализ напряженно-деформированного состояния и собственных частот анкера // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 2. – С. 40–45.
3. Бурау Н. И. Разработка метода диагностики функционального технического состояния элементов конструкций противоположных анкерных сооружений. Сообщение 2. Анализ собственных форм и частот сложной конструкции противоположного анкерного сооружения / Н.И. Бурау, Ю.В. Кльофа, Э.В. Кулиш // Там же. – 2011. – № 3. – С. 40–43.
4. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуля-

- ции: Пер с англ. / Под ред. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1972. – 744 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х кн. Кн. 2 / Изд. 2-е, перераб. и допол. – М.: Сов. радио, 1975. – 392 с.
6. Бурау Н. И., Игнатович С. Р. Оценивание параметра трещиноподобного повреждения лопаток в процессе виброакустического диагностирования газотурбинных двигателей // Надійність і довговічність машин і споруд: Міжнар. наук.-техн. зб. – Київ: ПІМ, 2008. – Вип. 30. – С. 32–40.

The non-destructive evaluation of the parameter of changing of a tension condition an anchor is proposed for the determination a current condition of the anchor against landslide construction by using the the generalized likelihood method. The analytical dependencies of estimations are obtained for the two features, the evaluation is carried out, the statistical characteristics of the estimations are analyzed.

*Keywords: anchor constructions, vibration diagnostics, anchor rod tensions, anti-slide pile structures*

*Поступила в редакцію  
26.12.2014*



## ЗАСІДАННЯ ТЕХНІЧНОГО КОМІТЕТУ ЗІ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТК-78

14 травня 2015 р. відбулося засідання ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», що опікується питаннями гармонізації стандартів у сфері неруйнівного контролю та технічної діагностики в Україні. Участь у засіданні взяли представники наукових, освітніх, промислових підприємств і організацій, що працюють у сфері неруйнівного контролю, зокрема, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НТУУ «Київський політехнічний інститут», ТК «Спецмонтаж», ПрАТ «ВТП «Укренергочормет», АТ «Одеський припортовий завод», ТОВ «Придніпровський АЦНК і ТД», ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади» та інші. Особлива увага учасників була присвячена припиненню до кінця поточного року дії на території України стандартів СРСР, що передбачено Програмою діяльності Кабінету міністрів України.

Для досягнення зазначеної мети національний орган по стандартизації повинен у поточному 2015 р. скасувати всі діючі в Україні стандарти СРСР (ГОСТ), розроблені до 1992 р. В сферу відповідальності ТК-78 увійшло 40 стандартів ГОСТ, які підлягають скасуванню. Отже, необхідно їх переглянути і замінити на відповідні національні, а у разі їх відсутності, на міжнародні або європейські стандарти.

На думку учасників, основна проблема скасування ГОСТ і переходу на міжнародні стандарти полягає у відмінності структур міжнародної і національної систем стандартизації. Зокрема, для системи міжнародних європейських стандартів в галузі неруйнівного контролю притаманна спеціалізація на конкретних напрямках, як то: технологія методу (способу), вимоги до дефектоскопічного обладнання, контрольних зразків, дефектоскопічних матеріалів, критеріїв приймання тощо. Тоді як стандарти, особливо ГОСТ, поєднують у собі всі ці вимоги для пев-



ного методу НК. Тому потрібно застосувати комплексний підхід, який передбачає, що замість одного стандарту ГОСТ потрібно ввести відразу кілька стандартів EN чи ISO, які відповідно встановлюють загальні вимоги до технології, апаратури, дефектоскопічних засобів, критеріїв приймання тощо. Заступник голови ТК-78 проф. Троїцький В.О., який очолює напрямок «Неруйнівний контроль», зазначив, що Технічний комітет підтримує тісні контакти з ISO/TC-135 «Неруйнівний контроль», а його керівник Хаджиме Катано відвідав Україну з візитом, у ході якого виступив з доповіддю на семінарі, організованому ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Підводячи підсумки, В.О. Троїцький зазначив, що Технічний комітет активно бере участь у діяльності Міжнародної організації із стандартизації з усіх методів неруйнівного контролю і має і надалі відігравати провідну роль у гармонізації національної системи стандартизації з міжнародною та європейською. Він запропонував створити робочу групу для перегляду ГОСТ, що підлягають скасуванню, та підготовки пропозицій щодо їх адекватної заміни на відповідні національні та міжнародні стандарти, які будуть передані до національного органу стандартизації.

*Щупак С. О.,  
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України*