

УДК 621.317

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ АРМАТУРНЫХ ПУЧКОВ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Коряшкин А.С., Матвеев А.И.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40

Система мониторинга за уровнем натяжения арматурных пучков защитной оболочки АМЦ 11830 представляет собой измерительную систему целевого применения. Внутри конструкции защитной оболочки в специальных каналах расположены высокопрочные арматурные пучки. Арматурный пучок представляет собой металлический канат, выполненный многорядовой укладкой из параллельных проволок. Функциональное назначение арматурного пучка - обеспечить предварительное напряжение железобетона, из которого выполнена конструкция реакторного отделения, тем самым обеспечивая прочность конструкции при возникновении аварийных ситуаций. Для измерений усилий натяжения арматурных пучков предназначен преобразователь силы измерительный. В работе описана конструкция системы натяжения арматурных пучков и метод преобразования силы. Подробно рассмотрен принцип измерения силы чувствительного элемента струнного датчика, используемого в системе. Описана функция преобразования измерительного канала силы.

Ключевые слова: система мониторинга, армопучок, чувствительный элемент, преобразователь силы, струна, деформация.

MEASURING THE TENSION FORCE REBAR BEAMS IN THE CONTAINMENT NPP UNITS

Koryashkin A.S., Matveev A.I.

Penza state university, 440026, Penza, st. Krasnaya, 40

Rebar beam tension level monitoring system is the target purpose measurement system. Inside the containment structure in special channels located high-strength rebar beams. Rebar beam is a metal rope, made of Multi-row laying parallel wires. Functional purpose of rebar beam is to provide a preliminary tension of reinforced concrete, from which reactor building construction is made up, thereby providing strength in the case of emergency. For rebar beam tension effort measurement, Measuring Force Converter is intended. This work describes rebar beam tension system and force conversion method. Force measurement of sensitive element of string sensor, which is used in the system, concept is discussed in detail. Force measurement channel conversion function is described.

Key words: monitoring system, bundled bar, sensor, force transmitter, string, deformation.

Система мониторинга за уровнем натяжения арматурных пучков защитной оболочки АМЦ 11830 (далее - система) представляет собой измерительную систему целевого применения. Внешний вид защитной оболочки приведен на рисунке 1. Внутри многослойной железобетонной конструкции защитной оболочки (цилиндрической и купольной части) в специальных каналах расположены высокопрочные армопучки. Арматурный пучок представляет собой металлический канат, выполненный многорядовой укладкой из параллельных проволок с диаметром 5,2 миллиметра. Функциональное назначение армопучка - обеспечить предварительное напряжение железобетона, из которого выполнена конструкция реакторного отделения, тем самым обеспечивая прочность конструкции при возникновении аварийных ситуаций.

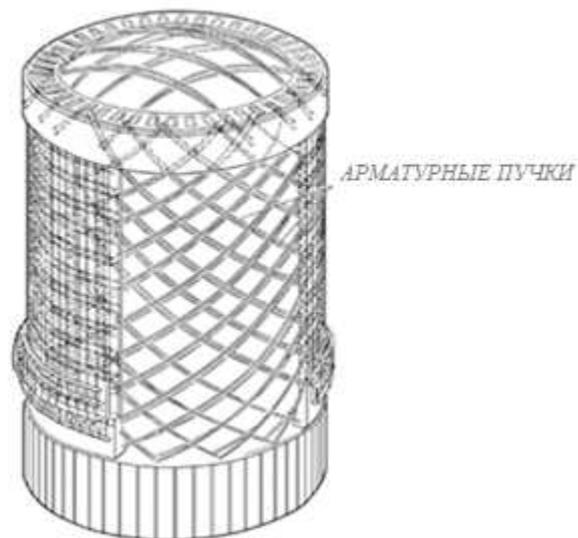


Рисунок 1 — Преднапряженная защитная оболочка атомного блока

Система предназначена:

- для контроля величины потерь усилий натяжения армопучков системы преднапряжения защитной оболочки (далее СПЗО) на их тяжных концах при передаче усилий с гидродомкрата на анкерное устройство СПЗО в период их натяжения;
- для наблюдения за динамикой изменения усилий натяжения армопучков СПЗО на их анкерах в период эксплуатации.

Система является многоканальной и имеет до 32 измерительных каналов, объединенных в 2 направления.

Система состоит из следующих основных функциональных частей:

- рабочей станции;
- преобразователей силы измерительных (далее - ПСИ-02);
- коммутационных коробок (далее - КК);
- комплекта кабелей;
- программного обеспечения (далее — ПО).

ПСИ-02 предназначен для измерений усилий натяжения арматурных пучков СПЗО. Внешний вид ПСИ-02 представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 — Внешний вид ПСИ-02

ПСИ-02 состоит из датчиков силы ДС-03, преобразователя сигнала датчика ПСД-С-01 и двух кабелей. Количество измерительных каналов силы в ПСИ-02 - 12. Для каждого измерительного канала силы ПСИ-02 определены коэффициенты индивидуальной функции преобразования. Входным сигналом измерительного канала силы ПСИ-02 является сила, воздействующая на один измерительный модуль ДС-03 в диапазоне от 0 до 1,25 МН.

Принцип работы ПСИ-02 основан на зависимости собственной частоты свободных колебаний струны чувствительного элемента от ее натяжения.

Чувствительный элемент состоит из натянутой струны (тонкой стальной проволоки) и электромагнитной головки с катушкой. Струна приводится в колебательное движение с помощью возбудителя колебаний, функции которого выполняет электромагнитная головка.

Возбудитель колебаний трансформирует энергию электрического импульса запроса, поступающего от ПСД-С-01, в энергию колебаний струны. Электромагнитная головка с катушкой используется как для подачи возбуждающего импульса, так и для приёма затухающих свободных колебаний, генерируемых струной (импульс запроса и собственная частота свободных колебаний струны передаются по одной и той же линии в ПСД-С-01).

Рассмотрим принцип действия чувствительного элемента.

На рисунке 3 представлена струна длиной l , закреплённая с предварительной силой натяжения F , в первом приближении постоянной (рис. 3а). Приняв, что колебания струны происходят в плоскости $ХОУ$, рассмотрим фрагмент струны с массой dm (рис. 3б).

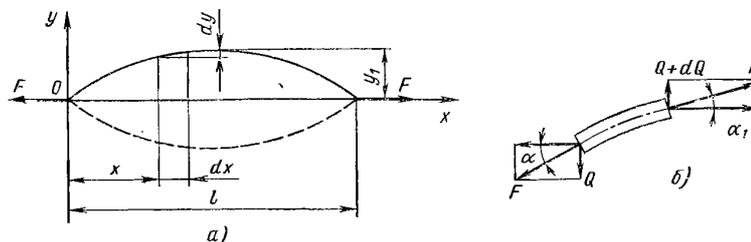


Рисунок 3 – Схема движения струны

Проекция натяжения на ось OY в точке x составит

$$Q = -F \cdot \sin \alpha,$$

а в точке $x + dx$

$$Q + dQ = F \cdot \sin \alpha_1.$$

Так как при малых амплитудах α и α_1 малы, то можно принять:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \partial y / \partial x;$$

$$\sin \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx.$$

Согласно принципу Даламбера, для нахождения уравнения движения необходимо приравнять эту силу к силе инерции фрагмента струны:

$$dm \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}.$$

С учётом того что $dm = (m/l)dx$, где m – масса струны, и обозначив $Fl/m = a^2$, получим уравнение плоских поперечных колебаний натянутой струны:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{a^2 \partial^2 y}{\partial x^2}. \quad (1)$$

При следующих условиях на концах струны:

1) $x = 0$ и $x = l$, $y = 0$;

2) $t = 0$, $y(x) = F(x,0)$,

решение уравнения (1) получим в виде

$$y = C_n \sin\left(\frac{n\pi}{l}\right) x \cos\left(\frac{\omega n \pi}{l}\right) (t - \tau_n), \quad (2)$$

где C_n и τ_n – постоянные, n – целое число.

Полученное уравнение характеризует колебательное движение с периодом:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega n \pi / l} = \frac{2l}{\omega n},$$

откуда частота колебаний:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{vn}{2l} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Fl}{m}} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\sigma/\rho}, \quad (3)$$

где σ – напряжение в струне, $\sigma = F/s$, s – площадь поперечного сечения струны; ρ – плотность материала струны, $\rho = m/sl$.

При $n = 1$ струна колеблется с образованием одной полуволны, при $n = 2$ – двух полуволн и т.д.

Данные формулы справедливы для случая тонкой длинной струны, у которой можно пренебречь поперечной жёсткостью для пренебрежимо малой амплитуды колебания. Уточнённая формула частоты для круглой короткой струны при определённых соотношениях жёсткости струны, вызванной предварительным натяжением, и собственной жёсткостью имеет вид:

$$f = \frac{1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\lambda_1 Er^2 + \lambda_2 \sigma l^2}{\rho}}, \quad (4)$$

где r – радиус струны, $\lambda_1 = 504$; $\lambda_2 = 11,85$ при $\sigma l^2/Er^2 \leq 106,5$; $\lambda_1 = 594,5$; $\lambda_2 = 11$ при $106,5 \leq \sigma l^2/Er^2 \leq 555,8$; $\lambda_1 = 928$; $\lambda_2 = 10,4$ при $\sigma l^2/Er^2 \geq 555,8$.

В приведённых формулах не учтено изменение силы натяжения струны при колебаниях. На рисунке 4 показан вид зависимости силы при колебаниях. За период колебаний T сила ΔF дважды проходит через максимум.

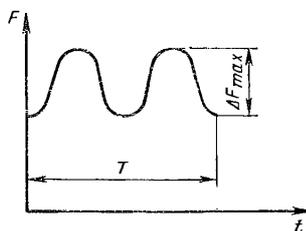


Рисунок 4 – Зависимость силы натяжения струны от амплитуды колебаний во времени.

Если задаться синусоидальной формой изгиба струны, можно определить кривую между точками $x = 0$ и $x = l$ как $y = y_1 \sin \pi x/l$, где y_1 – амплитуда гармоники. Длина дуги, описываемой этой формулой, равна:

$$\int_0^l \sqrt{1 + (\partial y / \partial x)^2} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{y_1^2 \pi^2}{l^2}\right) \cos^2 \pi x/l} dx = \int_0^l \left[1 + \frac{y_1^2 \pi^2}{l^2} \cos^2 \pi x/l\right] dx = l \left[1 + \frac{\pi^2 y_1^2}{4l^2}\right], \quad (5)$$

откуда относительное удлинение струны при колебаниях:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\pi^2 y_1^2}{4l^2}, \quad (6)$$

а изменение натяжения:

$$\Delta F = \frac{\Delta E s}{l} = \frac{\pi^2 E s y_1^2}{4l^2} = C y_1^2, \quad (7)$$

где $C = \frac{\pi^2 E s}{4l^2}$.

Отсюда видно, что изменение натяжения струны растёт с ростом её отклонения пропорционально квадрату этого отклонения и не зависит от знака.

Оценим частоту колебаний струны. Установлено, что частота колебаний возрастает с увеличением амплитуды колебаний, для нашего случая:

$$f_n = f \left(1 + \frac{3}{8} \frac{\pi^2 E s}{4l^2 F} y_1^2 \right). \quad (8)$$

Относительное изменение частоты:

$$\delta = \frac{f_n - f}{f} = \frac{3}{8} \frac{\pi^2 E}{4l^2 \sigma} y_1^2, \quad (9)$$

где $\sigma = E/s$ – напряжение в струне.

При деформации струны меняется напряжение в струне и, следовательно, её резонансная частота. Согласно выражению (3):

$$f + \Delta f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma + \Delta \sigma}{\rho}}.$$

Тогда изменение частоты будет:

$$\Delta f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma + \Delta \sigma}{\rho}} - \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta \sigma}{\sigma}} - 1 \right).$$

Откуда:

$$|\Delta f| = n \Delta \sigma / 4l \sqrt{\rho \sigma}. \quad (10)$$

Относительное изменение частоты $\Delta f/f = \Delta \sigma / 2 \sigma$,

откуда изменение напряжения в струне $\Delta \sigma = 2 \Delta f \sigma / f$.

Из полученных формул следует, что чувствительность при измерении механического напряжения тем выше, чем меньше длина струны, плотность материала струны и предварительное напряжение в струне при первой форме колебаний.

Частота переменной электродвижущей силы, генерируемая в чувствительном элементе колеблющейся струной, является информативным параметром выходного сигнала измерительного модуля.

При воздействии силы на модуль струна подвергается растяжению, что приводит к изменению периода собственных свободных колебаний струны. По изменению длительности периода колебаний струны судят об измеряемой силе.

ПСД-С-01 преобразует период собственных свободных колебаний струны модулей в цифровой код, обеспечивает временное хранение полученной информации и связь с ПЭВМ по интерфейсу стандарта RS-485.

Входным сигналом ПСИ-02 является сила в диапазоне от 0 до 15,0 МН, воздействующая на 12 измерительных модулей ДС-03. Погрешность ПСИ-02 определяется по алгебраической сумме экспериментально определённых приведённых погрешностей 12-ти измерительных каналов силы (с учётом знака погрешности), разделённых на количество каналов (12) по формуле:

$$\gamma_n = \frac{\gamma_{1к\max} + \gamma_{2к\max} + \dots + \gamma_{11к\max} + \gamma_{12к\max}}{12}, \quad (11)$$

где $\gamma_{1\max} - \gamma_{12\max}$ - максимальные значения погрешностей 1-12 измерительных каналов силы ПСИ-02.

Индивидуальная функция преобразования измерительного канала силы ПСИ-02 $F_{i\text{ex}}$, кН, определяется по формуле:

$$F_{i\text{ex}} = A \cdot \Delta f_i^4 + B \cdot \Delta f_i^3 + C \cdot \Delta f_i^2 + D \cdot \Delta f_i + E, \quad (12)$$

где $A; B; C; D; E$ - коэффициенты индивидуальной функции преобразования, определяемые в соответствии с методикой определения коэффициентов индивидуальной функции преобразования и приведённой погрешности измерительного канала силы при нормальных климатических условиях (далее - НКУ)

плюс $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, $\frac{\text{кН}}{\text{кГц}^4}$, $\frac{\text{кН}}{\text{кГц}^3}$, $\frac{\text{кН}}{\text{кГц}^2}$, $\frac{\text{кН}}{\text{кГц}}$, кН соответственно;

Δf_i - девиация частоты, кГц , определяется по формуле:

$$\Delta f_i = \frac{1}{T_i + k(t_i - t_{\text{нкү}})} - \frac{1}{T_0}, \quad (13)$$

где T_i - период свободных колебаний при i -й нагрузке, мс ;

T_0 - период свободных колебаний без нагрузки при НКУ, мс ;

t_i - температура во время измерений, $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{нкү}}$ - температура при НКУ, $^\circ\text{C}$;

k - коэффициент функции влияния температуры на величину выходного сигнала модуля

для интервалов температур от $t_{\text{нкү}}$ до плюс 60°C и от минус 10°C до $t_{\text{нкү}}$, $\frac{\text{мкс}}{^\circ\text{C}}$,

определяемый в соответствии с методикой определения коэффициентов индивидуальной функции преобразования и приведённой погрешности измерительного канала силы.

Список литературы

1. Арматурные пучки [Электронный ресурс]. - URL: http://www.baurum.ru/_library/?cat=armaturebase&id=170 (дата обращения: 06.03.2013).
2. Преобразователь силы измерительный ПСИ-02. Руководство по эксплуатации. – Пенза : НИИ «Контрольприбор».
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под общ. ред. д.т.н. Е.П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
4. Система мониторинга за уровнем натяжения арматурных пучков защитной оболочки АМЦ 11830 [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.niikp-penza.ru/armoruchki> (дата обращения: 06.03.2013).
5. Труды ИБРАЭ РАН / под общ. ред. чл.-кор. РАН Л.А. Большова ; Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН. – М. : Наука, 2007. – Вып. 6: Механика преднапряженных защитных оболочек АЭС / науч. ред. Р.В. Арутюнян. – 2008. – 151 с.

Рецензенты:

Громков Николай Валентинович, д.т.н., профессор ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Трофимов Алексей Анатольевич, д.т.н., доцент, заместитель начальника УНЦ-37 открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт физических измерений», г. Пенза.