УДК 681.586.785

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТРОСОВ ВАНТОВЫХ МОСТОВ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВИЛЛАРИ

Манцуров Алексей Валерьевич, Назаренко Владимир Сергеевич, Сомов Сергей Андреевич, Мерзляков Андрей Фёдорович, Поносов Дмитрий Андреевич
Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15, csomov@mail.ru

Чебыкин Иван Андреевич
ОАО «Институт Гипростроймост»,
129626, г. Москва, ул. Павла Корчагина, д. 2, chebykin@giprosm.ru

Рассматриваются теоретические основы и практическое применение эффекта Виллари на примере разработанной системы мониторинга силовых тросов вантовых подвесных мостов. Силовые тросы представляют собой ферромагнитные стержни повышенной прочности. Для ферромагнитных материалов свойствен ярко выраженный магнитоупругий эффект, позволяющий оценивать механическое состояние троса электромагнитными бесконтактными методами благодаря влиянию внешнего деформирующего воздействия на магнитные свойства троса. Демонстрируется функциональная схема измерительного блока разработанной системы мониторинга с описанием работы всех основных узлов. Разработана математическая модель, раскрывающая особенности работы измерительного блока системы мониторинга. Математическая модель сопоставляется с результатами проведенных экспериментов.
Ключевые слова: вантовые мосты, эффект Виллари, система мониторинга.

С давних пор для упрощения коммуникации человечество использует мосты. Развитие транспортной инфраструктуры, а также увеличение городов породило необходимость создания новых видов мостов, которые способны совместить в себе несколько качеств: возможность строительства на широких водоемах и на сложном рельефе местности, а также выдерживать большой транспортный поток. Вантовые мосты отвечают всем этим требованиям. Вантовый мост представляет собой тип подвесного моста, состоящий из нескольких пилонов, соединенных с дорожным полотном стальными тросами – вантами. Один такой вант состоит из отдельных тонких тросов (стрендов), а стренд, в свою очередь, формируется из шести металлических стержней, обвитых вокруг седьмого, центрального. Преимущество таких систем в том,

Манцуров А.В., Назаренко В.С., Сомов С.А, Мерзляков А.Ф., Поносов Д.А., Чебыкин И.А., 2020

что каждый стенд отдельно крепится и отдельно натягивается при креплении к анкерам пилона.

Конструкция вант является, пожалуй, наиболее высокотехнологичным моментом, учитывая всю сложность его инженерного проектирования. Но в процессе конструирования возникают проблемы и вопросы о воздействии внешней среды. И разумеется, ванты, как и другие элементы моста подвержены этому воздействию, что может привести к серьезным изменениям внутри структуры, таким как обрыв жил, поэтому необходима система постоянного мониторинга для обеспечения максимальной надежности и безопасности данных структур. На данный момент для мониторинга конструкций применяются три типа датчиков: тензорезисторный, струнный и электромагнитный [1-3]. Однако они имеют некоторые недостатки, такие как непосредственное внедрение в место крепления несущей конструкции, нарушающей изоляцию стержневого элемента, а также необходимость подавать и пропускать большие токи через датчик [4-6].

Таким образом целью работы является разработка системы мониторинга для контроля механических усилий вант методом неразрушающего контроля на основе магнитострикции, а именно эффекта Виллари.

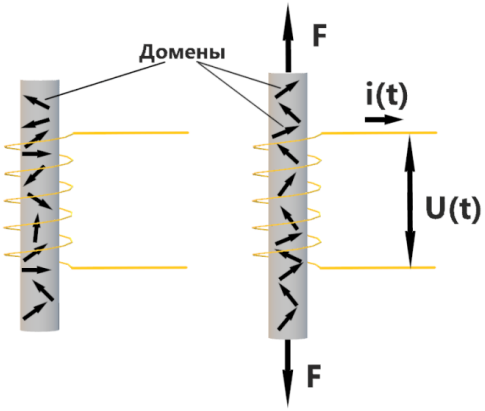


Рисунок 1. Ферромагнитный образец, помещенный в датчик

Описание эффекта

В физике хорошо известно и достаточно широко применяется явление магнитострикции – изменение размеров и формы тела при намагничивании. Этот эффект был обнаружен и изучен в 1842 г. Джеймсом Джоулем. По сравнению с другими веществами в ферромагнетиках явление магнитострикции проявляется наиболее выражено. Однако существует и обратный эффект – изменение намагниченности ферромагнетика при деформации – так называемый магнитоупругий эффект или эффект Виллари [7, 8]. Изменение намагниченности при деформации объясняется тем, что при воздействии механических напряжений изменяется доменная структура ферромагнетика как показано, определяющая его намагниченность. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показаны ферромагнитные образцы, помещенные в электромагнитный датчик. Черными стрелками внутри образцов показаны векторы намагниченности отдельных доменов. Прикладывая к образцу усилие растяжения F, меняются магнитные свойства системы датчик-трос, влияющие на величину переменного тока $i(t)$ возникающего в результате приложенного напряжения $U(t)$.

При реконфигурации доменной структуры происходит изменение магнитной проницаемости ферромагнетика, причем это изменение может быть как положительным, так и отрицательным.

Магнитоупругие свойства вещества могут быть охарактеризованы коэффициентом магнитоупругой чувствительности (1)

$$K_\sigma = \frac{\Delta\mu / \mu}{\sigma} \tag{1}$$

где $\Delta\mu/\mu$ - относительное изменение магнитной проницаемости, а σ - механическое напряжение.

В разработанной системе мониторинга электромагнитный датчик представляет собой соленоид с исследуемым ферромагнитным сердечником. В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа можно определить индуктивность соленоида (2) с сердечником следующим образом

$$L = \mu_0 \mu S n^2 l \tag{2}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость, S – площадь витка, n – число витков на единицу длины, l – длина соленоида.

При воздействии на сердечник силы натяжения F изменяется не только магнитная проницаемость μ, но и площадь поперечного сечения ферромагнетика A. Запишем изменение индуктивности соленоида (3), дифференцируя приведенное выше выражение (2)

$$\Delta L = \frac{\partial L}{\partial \mu}\Delta\mu + \frac{\partial L}{\partial S}\Delta S = L\left(\frac{\Delta\mu}{\mu} + \frac{\Delta A}{A}\right) \tag{3}$$

Проведенные эксперименты показывают, что относительным изменением площади поперечного сечения можно пренебречь, по сравнению с относительным изменением магнитной проницаемости для веществ с ярко выраженным магнитоупругим эффектом. Таким образом

$$\Delta L \approx L\frac{\Delta\mu}{\mu} = L\sigma K_\sigma \tag{4}$$

Исходя из полученного выражения (4) можно сделать вывод, что при определенном ферромагнитном материале для улучшения эффекта необходимо использовать соленоид с большим значением индуктивности и прикладывать значительное механическое воздействие.

Измерительный блок системы мониторинга

Рассмотрим функциональную схему разработанной системы мониторинга показанную на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**.

Через катушку L, изображенной в верхней части схемы, сердечником которой выступает стальной трос, протекает ток, формируемый системой ключей Kij, драйвером (Д) и микроконтроллером (МК). Для управления системой коммутации МК использует блок ПВВ – порт ввода/вывода. Переменный ток, протекающий по соленоиду L, порождает переменное магнитное поле в объеме ферромагнитного материала. В схему введен низкоомный резистор R, на котором падает напряжение, пропорциональное току, протекающего через катушку L. При изменении магнитных свойств троса, как было показано ранее, изменяется индуктивность системы катушка-трос, что приводит к изменению величины переменного тока. Так как ток, протекающий по резистору R, обладает достаточно сложной формой, целесообразно измерять его среднее за период значение. Преобразование переменного сигнала в постоянное – среднее значение тока, выполняет фильтр нижних частот (ФНЧ). Далее сигнал оцифровывается с помощью встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Дальнейшая обработка и интерпретация оцифрованных данных осуществляется в разработанном приложении на персональном компьютере (ПК). Температура троса и катушки измеряется с помощью выносных датчиков температуры ДТ1 и ДТ2 соответственно. Место подключения катушки на схеме обозначено специальными контактными площадками и подписаны как L.

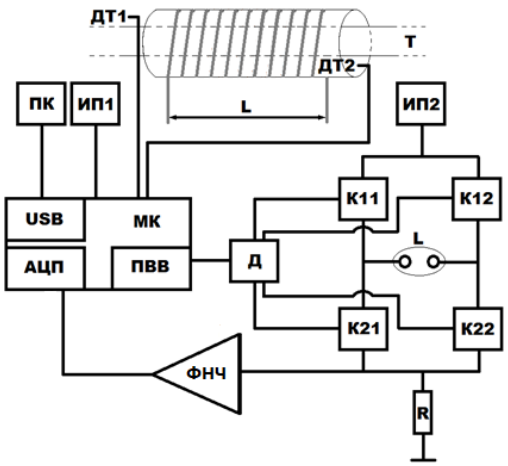


Рисунок 2. Функциональная схема измерительного блока системы мониторинга

Математическая модель измерительного блока

Для построения математической модели измерительного блока рассмотрим эквивалентную схему, показанной на Рисунок . Здесь величины R_D и L_D отвечают за соленоид датчика, а R_L, L_L, C_L – параметры кабеля, которым подключается датчик, R_i - сопротивление токоизмерительного резистора.

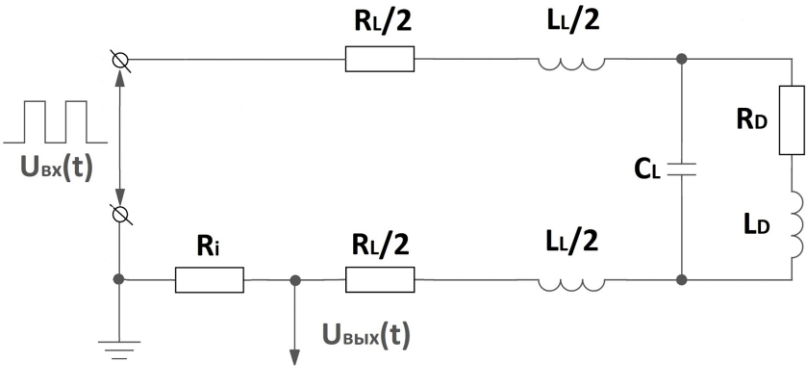


Рисунок 4. Эквивалентная схема измерительного блока

На вход системы поступает периодический прямоугольный сигнал (5), описываемый следующей функцией

$$U_{вх}(t)=U_0\left(\sigma(t)-\sigma(t-\tau)\right) \tag{5}$$

где U_0 – амплитуда входного сигнала; $\sigma(t)$ – функция включения, которая равна 1 при $t\in[0;+\infty)$; τ – время единичного импульса. В момент времени $t=0$ $U_{вх}=U_0$, далее после $t=\tau$ $U_{вх}=0$, до времени $t=T$, которое является периодом сигнала. $U_{вх}(t)$ можно представить как сумму падений напряжений (6) на элементах цепи:

$$U_{вх}(t)=U_{R_L}(t)+U_{L_L}(t)+U_{C_L}(t)+U_{L_L}(t)+U_{R_L}(t)+U_{R_i}(t) \tag{6}$$

Данное выражение представляет собой интегро-дифференциальное уравнение относительно токов, протекающих в приведенной схеме. Применим к полученному выражению (6) преобразование Лапласа $\mathrm{L}[\ ]$ и получим передаточную функцию (7)

$$W(p)=\frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)}= \tag{7}$$

$$\frac{R_i+R_iC_LR_Dp+R_iC_LL_Dp^2}{R_L+R_D+R_i+p\left(R_LC_LR_D+L_L+R_iC_LR_D+L_D\right)+p^2\left(R_LC_LL_D+L_LC_LR_D+R_iC_LL_D\right)+p^3\left(L_LC_LL_D\right)}$$

Пренебрегая кубическим слагаемым в знаменателе передаточной функции (7), можно получить аналитическое выражения для выходного напряжения при заданном входном сигнале. В заданных диапазонах изменения параметров полученная аналитическая зависимость с заданной точностью совпадает с численным решением исходной передаточной функции. Таким образом модифицированная передаточная функция (8) принимает следующий вид

$$W(p)=\frac{\alpha}{l}\left[1+\frac{p\xi+\zeta}{\left(p-p_{1п}\right)\left(p-p_{2п}\right)}\right] \tag{8}$$

где $p_{1п}$ и $p_{2п}$ полюсы функции $W(p)$ и введены следующие обозначения:

$$\alpha=R_iC_LL_D \qquad l=R_LC_LL_D+L_LC_LR_D+R_iC_LL_D$$

$$\beta=R_iC_LR_D \qquad m=R_LC_LR_D+R_iC_LR_D+L_L+L_D$$

$$\gamma=R_i \qquad n=R_L+R_D+R_i$$

$$\xi=\frac{\beta}{\alpha}-\frac{m}{l} \qquad \zeta=\frac{\gamma}{\alpha}-\frac{n}{l}$$

В пространстве комплексной частоты образ выходного сигнала (9) может быть определен как произведение передаточной функции $W(p)$ и образа входного сигнала $U_{вх}(p)$

$$U_{вых}(p)=W(p)U_{вх}(p) \tag{9}$$

$$U_{вх}(p)=\mathrm{L}\left[U_{вых}(t)\right]=\mathrm{L}\left[U_0\left(\sigma(t)-\sigma(t-\tau)\right)\right]=\frac{U_0}{p}\left(1-e^{-\tau p}\right)$$

где

Таким образом

$$U_{вых}(p)=\frac{\alpha}{l}\left[1+\frac{p\xi+\zeta}{\left(p-\tilde{\ldots}\right)\left(\tilde{\ldots}\right)}\right]\frac{U_0}{\ldots}\left(1-e^{-p\tau}\right) \tag{10}$$

Применив обратное преобразование Лапласа для (11)

$$U_{вых}(p)=\mathrm{L}^{-1}\left[W(p)U_{вх}(p)\right],$$

получим функцию выходного сигнала (12) во временном t пространстве

$$U_{вых}(t)=\frac{\alpha U_0}{l}\left[\left(1+\frac{\zeta}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\left(\tilde{\ldots}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\tilde{\ldots}}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}\right)-\left(1+\frac{\zeta}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\left(\tilde{\ldots}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\tilde{\ldots}}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}\right)\right]= \tag{12}$$

$$=\frac{\alpha U_0}{l}\left[U_{вых_1}(t)-U_{вых_2}(t-\tau)\right]$$

В результате изменения температуры датчика и магнитных свойств сердечника, исходный сигнал претерпевает существенные изменения. Для оценки этих изменений выполняется операция усреднения переменного выходного сигнала (13), которая может быть записана следующим образом

$$\overline{U}_{вых}(t)=\frac{\alpha U_0}{l}\left[\frac{1}{T}\int_0^T U_{вых_1}(t)dt-\frac{1}{T}\int_\tau^T U_{вых_2}(t-\tau)dt\right] \tag{13}$$

Конечное выражение имеет вид

$$\overline{U}_{вых}(t)=\frac{\alpha U_0}{l}\frac{1}{T}\left[\tau+\frac{\zeta\tau}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\xi e^{\tilde{\ldots}}\left(1-e^{\tilde{\ldots}}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\zeta e^{\tilde{\ldots}}\left(1-e^{\tilde{\ldots}}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\zeta e^{\tilde{\ldots}}\left(1-e^{\tilde{\ldots}}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}+\frac{\zeta e^{\tilde{\ldots}}\left(1-e^{\tilde{\ldots}}\right)}{\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}\,\tilde{\ldots}}\right] \tag{14}$$

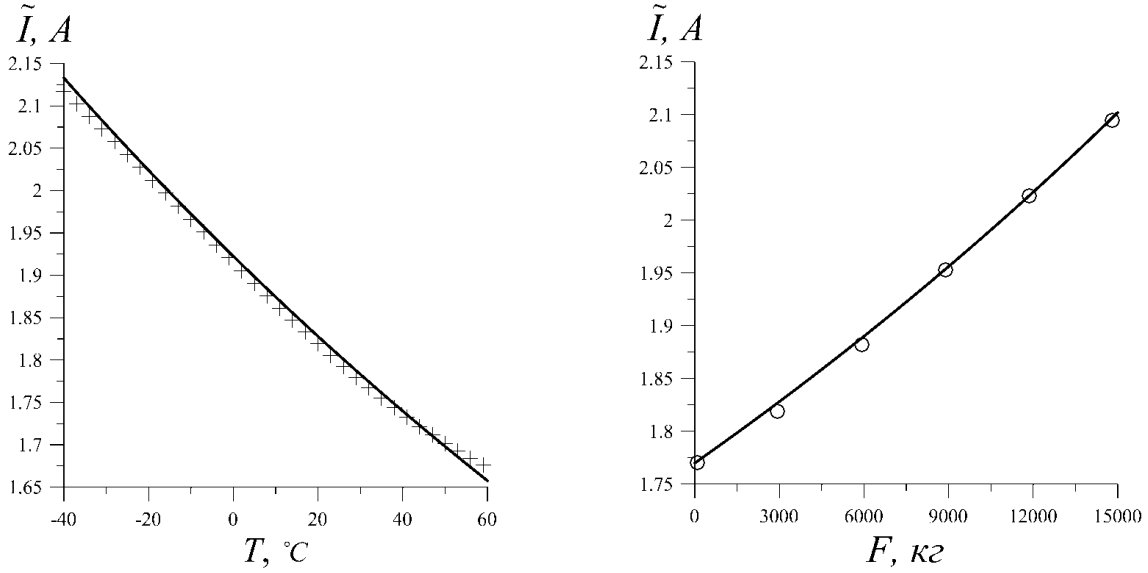
Для проверки справедливости построенной математической модели был проведен ряд экспериментов на универсальной испытательной машине Zwick Z-250 фирмы Zwick/Roell (Германия). Проводились испытания на растяжение троса при различных условиях нагружения (температура, скорость нагружения).

Теоретические (сплошная линия) и экспериментальные зависимости представлены на Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей: а) – график зависимости эквивалентного тока, измеряемого системой от температуры датчика, б) – график зависимости эквивалентного тока измеряемого системой от прикладываемого к тросу усилия

. На Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей: а) – график зависимости эквивалентного тока, измеряемого системой от температуры датчика, б) – график зависимости эквивалентного тока измеряемого системой от прикладываемого к тросу усилия

а изображены зависимости эквивалентного измеряемого тока от температуры датчика, а на Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей: а) – график зависимости эквивалентного тока, измеряемого системой от температуры датчика, б) – график зависимости эквивалентного тока измеряемого системой от прикладываемого к тросу усилия

б – зависимости эквивалентного измеряемого тока от прикладываемого к образцу усилия. Видно, что экспериментально полученные данные довольно точно совпадают с теоретическими.



а) б)

Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей: а) – график зависимости эквивалентного тока, измеряемого системой от температуры датчика, б) – график зависимости эквивалентного тока измеряемого системой от прикладываемого к тросу усилия

Заключение

Рассмотрены теоретические основы и практическое применение эффекта Виллари на примере разработанной системы мониторинга силовых тросов вантовых подвесных мостов. Разработана математическая модель, раскрывающая особенности работы измерительного блока системы мониторинга. Показано, что математическая модель хорошо согласуется с результатами проведенных экспериментов. Построенная модель позволяет выявлять нетривиальные зависимости, что делает возможным улучшать конструкцию системы мониторинга в целом.

По результатам работы зарегистрированы патенты на изобретение [9] и полезную модель [10].

Библиографический список

1. Sumitro S., Jarosevic A., Wang M. L. Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement //The First fib Congress, Concrete Structures in the 21th Century, Osaka. – 2002. – С. 13-19.
2. Cappello C. et al. Calibration of elasto-magnetic sensors on in-service cable-stayed bridges for stress monitoring //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 466.
3. Liu X. et al. Comparison of AC and pulsed magnetization-based elasto-magnetic methods for tensile force measurement in steel strand //Measurement. – 2018. – Т. 117. – С. 410-418.
4. Zhang R. et al. Temperature compensation of Elasto-Magneto-Electric (EME) sensors in cable force monitoring using BP Neural Network //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 7. – С. 2176.
5. Duan Y. F. et al. Development of elasto-magneto-electric (EME) sensor for in-service cable force monitoring //International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2016. – Т. 16. – №. 04. – С. 1640016.
6. Kim J. et al. Development of embedded EM sensors for estimating tensile forces of PSC girder bridges //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 9. – С. 1989.
7. Мащенко И. П., Мащенко А. И. Теоретические основы эффекта Виллари //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – №. 3.
8. Zhao X., Lord D. G. Application of the Villari effect to electric power harvesting //Journal of applied physics. – 2006. – Т. 99. – №. 8. – С. 08M703.
9. Патент РФ № 2020109357, 2020.03.02. Способ мониторинга силового воздействия на ферромагнитный стержневой элемент // Патент России № 2724993. 2020. / Поносов Д. А., Чебыкин И. А., Манцуров А. В. [и др.].
10. Патент РФ № 2020109362, 2020.03.02. Электромагнитный датчик для измерения внутренних напряжений в стержневом ферромагнитном элементе строительной конструкции// Патент России № 199215. 2020. / Поносов Д. А., Чебыкин И. А., Манцуров А. В. [и др.].