

Информационные технологии

УДК 519.248

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ СУДОВ К ШЛЮЗАМ НА СУДОХОДНОМ КАНАЛЕ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

И.М. Ахметзянов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1
E-mail: goldberg@inbox.ru

Рассматривается метод оценки времени прохода судов между шлюзами в условиях отсутствия на судах автоматических идентификационных систем. Метод основан на анализе статистической информации движения судов на судоходном канале и используется при создании систем диспетчерского регулирования.

Ключевые слова: судоходный канал, автоматическая идентификационная система, гидротехнические сооружения, диспетчерское регулирование.

В настоящее время бурными темпами идет развитие систем поддержки принятия решений диспетчерского регулирования (СППРДР) движения флота на судоходных каналах с системой шлюзов. Целью таких систем является повышение качества работы судоходных каналов (СК), а именно: минимизация времени прохождения судов на СК, эффективное управление водными ресурсами, позволяющее экономить денежные средства на сокращении количества холостых шлюзований и перераспределении водных потоков между шлюзами.

Для получения информации о текущем положении судов диспетчерскими службами применяются автоматические идентификационные системы (АИС). По информации министерства транспорта на 2011 год, количество судов на территории РФ, оборудованных бортовыми АИС, не превышает 80 % от общего числа многотоннажных, маломерных и пассажирских судов. Кроме того, расстояние между шлюзами может варьироваться от нескольких сот метров до нескольких десятков километров. Топологическая разрозненность шлюзов и береговых станций АИС, а также особенности заграждающего рельефа на участках СК создают зоны нечувствительности береговых станций. В связи с этим возникает задача прогнозирования времени прибытия судов к шлюзам.

Согласно [1] выделяют следующие виды судов:

- скоростные суда ($v \geq 30$ км/ч);
- маломерные суда;
- буксируемые составы;
- толкаемые составы;
- пассажирские суда;
- суда с опасными, взрывчатыми или отравляющими веществами;

Ильнур Мидхатович Ахметзянов, аспирант.

– самоходные грузовые суда и т. д.

Далее будем обозначать всю совокупность видов судов через множество $Ts = \{ts_l\}$, где $l = 1..L$.

В рамках судоходного канала пронумеруем шлюзы, а также области входа А и В судов в канал: $X = \{X_{Az1}, X_{z1z2}, \dots, X_{z(n-1)zn}, X_{znB}\} = \{X_{ij}\}$, где $i, j = [0..n+1]$, $i \neq j$. Участок X_{ij} совпадает с X_{ji} , отличие состоит лишь в направлении движения объекта, которое обозначим как r . Примем $r=0$ при движении судна от шлюза с меньшим номером к шлюзу с большим номером; $r=1$ при движении судна от шлюза с большим номером к шлюзу с меньшим номером. Тогда имеем следующие обозначения (1):

$$X_{i,j} = \begin{cases} X_{i,i+1}^r, r=0 \\ X_{i,i-1}^r, r=1 \end{cases} = \begin{cases} X_i^0 \\ X_i^1 \end{cases} = X_i^r = \begin{cases} X_i' \\ X_i'' \end{cases}. \quad (1)$$

На каждом участке между шлюзами $X_i^r \in X$ можно выделить следующие промежутки (виды участков):

- участок с односторонним (поочередным) движением;
- участок с запрещением обгона и расхождения;
- участок с возможностью расхождения и обгона судов при ограничении скоростного режима.

Каждый такой промежуток обозначим как $x_{i,k}$, где $k=1..K_i$, K_i – количество промежутков, на которые разбит участок $X_i^r = \bigcup_{k=1}^{K_i} x_{i,k}^r$.

Следует отметить, что на всех видах участков существует максимально допустимое ограничение по скорости $\tilde{w}_{i,k}^r$:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_{i,k}^r &= f(\tilde{v}_{i,k}^r, \tilde{v}_{Ts}), \\ \tilde{v}_{i,k}^r &= f(x_{i,k}^r), \\ \tilde{v}_{Ts} &= f(w_{iz}), \\ w_{iz} &= f(ts), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tilde{v}_{i,k}^r$ – максимальная скорость объекта, движущегося в направлении r от шлюза (области входа) с номером i на промежутке k , указанная с помощью специальных знаков; $\tilde{v}_{Ts}$ – максимальная скорость судна в зависимости от его типа, установленная нормативными документами для соответствующего судоходного канала; w_{iz} – водоизмещение судна в зависимости от типа судна ts . Тогда выражение для расчета максимально допустимой скорости объекта (верхней границы скорости) примет следующий вид:

$$\tilde{w}_{i,k}^r = \min(\tilde{v}_{i,k}^r, \tilde{v}_{Ts}). \quad (3)$$

В рассматриваемой модели объект движется со скоростью $\tilde{w}_{i,k}^r$ при выполнении следующих условий и ограничений:

- 1) на участке (подучастке) движению судна не препятствуют другие суда. То есть никто не пытается обогнать рассматриваемый объект или разойтись с ним;
- 2) нет возмущающего воздействия в виде команды диспетчера шлюза (канала) об изменении скоростного режима;

- 3) движение объекта не ограничено погодными условиями;
- 4) на участке прохождения судна глубина канала не вносит изменений в скоростной режим объекта.

При выполнении условий (1) – (4) судоводитель руководствуется критерием минимизации времени прохождения судоходного канала, поэтому текущая скорость объекта $c_i \in C$ рассматривается как величина $w_{i,j,k}^r = \tilde{w}_{j,k}^r$ и вычисляется по формуле (3).

Рассмотрим влияние глубины канала на изменение скорости движения судна. Согласно работе [2] глубина канала (мелководье) влияет на параметры движения судна при выполнении следующего условия:

$$H_{эл} < 4 \cdot d + \frac{3 \cdot v_c^2}{g}, \quad (4)$$

где $H_{эл}$ – глубина канала на данном участке, м; d – средняя осадка судна, м; v_c – скорость объекта c , м/с; g – ускорение свободного падения, м/с². Тогда потерю скорости на мелководье при плавании в зоне докритических скоростей можно приближенно рассчитать по эмпирической формуле [3]

$$\Delta v = \min\left(4, 4 \cdot \frac{H_{эл}}{d} - 34 \cdot \frac{v_c}{\sqrt{g \cdot H_{эл}}}; 0\right). \quad (5)$$

В формуле (5) величина Δv измеряется в %, тогда при $\tilde{w}_{i,k}^r = v_c$ имеем:

$$w_{i,k}^r = \tilde{w}_{i,k}^r + \frac{\tilde{w}_{i,k}^r \cdot \Delta v}{100\%}. \quad (6)$$

Учитывая условие (4), а также обозначив $w = w_{i,k}^r$, $\tilde{w} = \tilde{w}_{i,k}^r$, подставим (5) в (6). Тогда фактическая скорость движения объекта будет определяться следующим соотношением:

$$w = \tilde{w} + \min\left(0, 044 \cdot \tilde{w} \cdot \frac{H_{эл}}{d} - 0, 34 \cdot \frac{\tilde{w}^2}{\sqrt{g \cdot H_{эл}}}; 0\right), \text{ при } H_{эл} < 4 \cdot d + \frac{3 \cdot \tilde{w}^2}{g}. \quad (7)$$

Использование формулы (7) целесообразно в тех случаях, когда участок прохождения между шлюзами наделен зонами мелководья и нет никаких статистических данных по участку в целом или по конкретному судну.

Рассмотрим прогноз скорости движения объекта w на участке в условиях неопределенности при наличии информации о временах прохождения участка другими судами. Согласно проведенным автором исследованиям на Волго-Донском судоходном канале (ВДСК), время прохождения любого судна по произвольному участку между шлюзами есть случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения. В эксперименте была задействована информация по 150 объектам, курсирующим по территории ВДСК в период с августа 2007 г. по октябрь 2008 г. Взяты данные по 5 участкам между шлюзами, длина которых колеблется в диапазоне от 1 до 14,5 км. Объем проанализированных данных составил 42000 значений.

В ходе исследований по каждому объекту $c_i \in C$ для случайной величины Y из генеральной совокупности формировалась выборочная $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ объемом $n \in [30; 70]$, где Y – время прохождения объектом $c_i \in C$ участка X_j между шлюзами

j и $j+1$. Далее проводилась идентификация закона распределения. Выяснилось, что случайная величина Y распределена по общему нормальному закону распределения, плотность распределения вероятностей которого имеет следующий вид:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}. \quad (8)$$

Идентификация закона распределения случайной величины Y проводилась на основе гипотезы H_0 – случайная величина Y распределена по нормальному закону распределения. Проверка гипотезы H_0 осуществлялась на основе непараметрического критерия согласия Колмогорова – Смирнова, статистика которого вычисляется по формуле

$$\lambda = \sqrt{n} \cdot \max_{\forall y} |F(y) - \tilde{F}(y)|, \quad (9)$$

где n – объем выборки, $F(y)$ – теоретическая функция распределения, $\tilde{F}(y)$ – выборочная функция распределения. Уровень значимости $\alpha = 0,05$.

На рисунке изображена гистограмма случайной величины $Y_{л5}$ и наложенный на нее график функции плотности распределения вероятностей (ПРВ) нормального закона распределения, где $Y_{л5}$ – время прохождения судна «Лахта» между 5-м и 6-м шлюзами. Таким образом, исследования показали, что время прохождения судов между шлюзами есть случайная величина, распределенная по нормальному закону распределения.



Гистограмма с наложенной ПРВ нормального закона распределения

В условиях отсутствия статистических данных по конкретному судну, движущемуся по судоходному каналу, предлагается использовать накопленную статистику по участку между шлюзами, тогда среднюю скорость движения w_{ik} судна с номером i между шлюзами на участке вычислим по формуле

$$w_{ik} = \frac{X_k \cdot m}{\sum_{\substack{i \neq j, \\ Ts_i = Ts_j}} \mu_{jk}}, \quad (10)$$

где X_k – длина участка с номером k между шлюзами; $j=1 \dots m$; m – количество судов, для которых накоплены статистические данные, такие что $Ts_i = Ts_j$, $i \neq j$; μ_{jk} –

математическое ожидание времени прохождения судном с номером j участка с номером k .

Если существует выборка $(y_1, \dots, y_n)$ для случайной величины Y_i по рассматриваемому судну с номером i , объем и качество которой являются удовлетворительными, а именно: $n \geq 30$ – объем выборки; Y_i распределена по закону (8) на основании критерия со статистикой (9), тогда w_{ik} вычисляется по следующей формуле:

$$w_{ik} = \frac{X_k}{\mu_{ik}}. \quad (11)$$

Рассмотренный метод позволяет осуществлять проведение прогноза времени прибытия судов к шлюзам на основе статистической информации по шлюзу, по конкретному движущемуся объекту, а также с учетом областей на СК, представляющих собой мелководье. Использование метода оправдано в случае отсутствия на судне АИС или существования таких участков между гидротехническими сооружениями, на которых фиксируется продолжительное отсутствие сигнала АИС в силу особенностей заграждающего рельефа.

Данный метод может быть использован при решении следующих задач: анализ и совершенствование организационно-технологической структуры диспетчерского регулирования движения флота; создание программных систем поддержки диспетчерского состава, осуществляющего регулирование движения судов на СК.

Метод прогнозирования времени прибытия судов к шлюзам на СК, рассмотренный в данной статье, использовался автором при выполнении НИОКР «Разработка организационно-технологической структуры диспетчерского регулирования движения флота на Волго-Донском водном пути от Волгограда до Ростова-на-Дону на основе математической модели проводки судов».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила плавания по внутренним водным путям Российской Федерации.
2. Управление судном и его техническая эксплуатация / Под ред. А.И. Щетининой. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 656 с.
3. Справочник капитана дальнего плавания / Под ред. Г.Г. Ермолаева. – М.: Транспорт, 1983. – 211 с.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2012 г.

A METHOD OF FORECASTING THE TIME FOR SHIP ARRIVALS AT NAVIGATION CANAL LOCKS FOR SUPERVISORY CONTROL SYSTEMS

I.M. Akhmetzyanov

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov
1, 1-st Krasnoarmeyskaya st., Saint-Petersburg, 190005

This article describes the method of estimating the time a ship requires for passing between the shipping locks provided the ship in question does not have an automatic identity system. The method is based on the statistics of the ship traffic analysis in a navigation canal and is used for the developing of supervisory control systems.

Keywords: navigation canal, automatic identification system, hydraulic facilities, supervisory control.

Ilnur M. Akhmetzyanov, Postgraduate student.

ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОДНОВИТКОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА В КАНАЛАХ ТЕРМОКОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ О МНОГОКООРДИНАТНЫХ СМЕЩЕНИЯХ ТОРЦОВ ЛОПАТОК И МЕТОД ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ¹

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук»
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61
E-mail: borovik@iccs.ru

Приведен анализ температурной погрешности в канале термодатчика системы сбора информации о координатах смещения торцов лопаток. Получены количественные оценки этой погрешности и предложен метод ее уменьшения. Рассматривается один из возможных вариантов реализации предлагаемого метода.

Ключевые слова: канал термодатчика системы, распределенный кластер из двух одновитковых вихретоковых датчиков, температурная погрешность, модель передачи тепла, метод уменьшения погрешности.

Введение. Известно, что в системах сбора измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) используются кластеры одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. В частности, при необходимости сбора измерительной информации о радиальных и осевых смещениях кластер содержит два ОВТД, ЧЭ которых через установочные отверстия в статорной оболочке вводятся в электромагнитное взаимодействие с торцами лопаток. Система отсчета OXYZ жестко связана со статорной оболочкой, а ее начало (точка O) находится на внутренней поверхности статорной оболочки (как и обращенные к лопаткам поверхности ЧЭ). При этом радиальным смещениям соответствует координата y , определяющая важный параметр компрессора и турбины – радиальный зазор (РЗ), осевым смещениям – координата x , а вращение лопаточного колеса происходит в направлении координатной оси Z .

Выходные параметры ЧЭ (величины индуктивностей), которые определяются изменениями радиальных и осевых смещений (координатами x и y), преобразуются в цифровые коды², а затем решается система уравнений

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

² Фиксация цифровых кодов может осуществляться в моменты прохождения замками лопаток геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера ОВТД, в моменты прохождения замками г.ц. и виртуального г.ц. в распределенном кластере ОВТД (РК ОВТД) либо в моменты времени, соответствующие минимальным значениям индуктивностей в РК ОВТД [2, 3].

Сергей Юрьевич Боровик (к.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Марина Михайловна Кутейникова, инженер.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Олег Петрович Скобелев (д.т.н., профессор), главный научный сотрудник.

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y), \\ C_2 = f_2(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

полученная на основе градуировочных характеристик (ГХ) измерительных каналов ЧЭ₁ и ЧЭ₂, найденных экспериментально и введенных в систему сбора заранее, а также текущих значений кодов C_1 и C_2 в тех же каналах датчиков в составе кластера [2, 3].

Однако ЧЭ ОВТД, находясь в газозоудушном тракте, подвергнуты существенным температурным воздействиям – до 650 °С в компрессоре и 1500 °С в турбине, что является причиной значительных температурных изменений индуктивности ЧЭ и, как следствие, соответствующих изменений искомым координат.

Поэтому при получении измерительной информации о радиальных и осевых смещениях производится термокоррекция, предусматривающая экспериментальное определение семейств ГХ во всем диапазоне температур (Θ)

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y, \Theta), \\ C_2 = f_2(x, y, \Theta), \end{cases} \quad (2)$$

а также измерение текущих значений температуры ЧЭ с помощью термодпар (ТП), встроенных в ОВТД [1]. В системе предусмотрены также специальные каналы термокоррекции, в которых осуществляется нормализация сигналов ТП, преобразование в код, расчет физических значений с последующим приведением уравнений (2) к виду (1) и вычисление координат x и y с учетом текущих значений температуры [2]. Необходимо отметить, что горячий спай (ГСп) встроенной в датчик ТП находится на расстоянии около 5 мм от ЧЭ внутри тоководов (ТВ), соединяющих ЧЭ с объемным витком согласующего трансформатора (СТ), который размещен с внешней стороны статорной оболочки в зоне низких температур. В существующих системах сбора информации о координатах смещения торцов лопаток принято, что температура среды в газозоудушном тракте ($\Theta_{\text{сп}}$) равна температуре ЧЭ ($\Theta_{\text{чэ}}$) и равна температуре ГСп ТП ($\Theta_{\text{тп}}$), т. е. $\Theta_{\text{сп}} = \Theta_{\text{чэ}} = \Theta_{\text{тп}}$, причем это равенство сохраняется как в процессе градуировки, так и на рабочих режимах компрессора и турбины. Между тем представляется очевидным, что большой температурный перепад между средой в газозоудушном тракте и внешней по отношению к статорной оболочке воздушной средой создает тепловой поток в ТВ и, как следствие, температурный перепад на участке между ЧЭ и ГСп ТП, который определяет погрешность измерения температуры в канале термокоррекции.

Анализ литературных источников показывает отсутствие каких-либо количественных оценок таких погрешностей, и настоящая статья призвана устранить существующий пробел. Кроме того, в статье предлагается метод уменьшения выявленных погрешностей и возможность его реализации.

Погрешность измерения температуры. На рис. 1 дано схематическое и существенно упрощенное изображение ОВТД, удобное для анализа теплообмена между элементами конструкции датчика и окружающей средой. Здесь, в частности, два соосных цилиндрических ТВ, разделенных тонким слоем высокотемпературного диэлектрика, представлены как один цилиндр с внутренним радиусом r_1 и внешним r_2 . Кроме того, конструктивные особенности ОВТД и способ крепления датчика таковы, что в установочном отверстии существует воздушный зазор между ТВ и статорной оболочкой, который сводит к минимуму теплообмен между ними. Поэтому можно считать, что тепловой поток (q) не имеет каких-либо потерь по ТВ от ЧЭ до СТ в соответствии с моделью, приведенной на рис. 2.

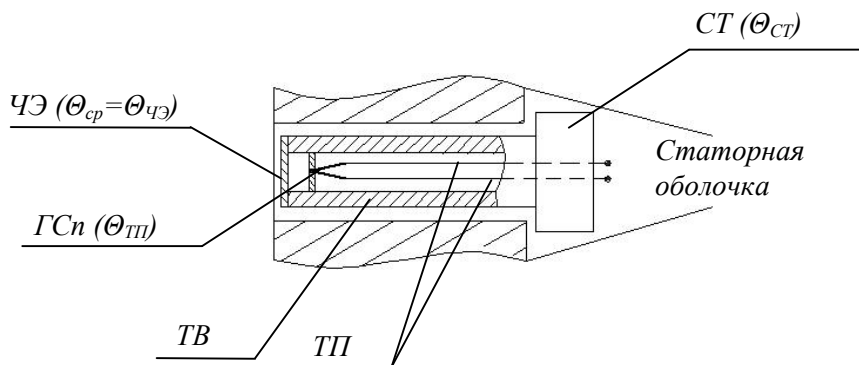


Рис. 1. Схематическое изображение ОВТД со встроенной ТП



Рис. 2. Модель передачи тепла в ТВ

Тогда выражение для теплового потока можно представить в виде

$$q = \frac{\Theta_{ЧЭ} - \Theta_{СТ}}{R}, \quad (3)$$

где R – тепловое сопротивление ТВ, которое можно представить суммой тепловых сопротивлений от ЧЭ до ГСП ТП (R_1) и от ГСП до СТ (R_2), т. е. $R = R_1 + R_2$. Тепловой поток q , проходящий через тепловое сопротивление R_1 , создает на нем температурный перепад $\Delta\Theta_{R_1} = q \cdot R_1$, который определяет погрешность (Δ) измерения температуры $\Theta_{ЧЭ}$ ($\Theta_{ср}$). Используя выражение (3), искомую погрешность представим как

$$\Delta = \Delta\Theta_{R_1} = \frac{\Theta_{ЧЭ} - \Theta_{СТ}}{R_1 + R_2} \cdot R_1. \quad (4)$$

Если $\Theta_{ЧЭ}$ изменяется в диапазоне от $\Theta_{ЧЭ\min}$ до $\Theta_{ЧЭ\max}$, то, обозначив в выражении (4) температурный перепад $\Theta_{ЧЭ} - \Theta_{СТ} = \Delta\Theta$, можно получить приведенную погрешность в виде

$$\delta = \frac{\Delta}{\Theta_{ЧЭ\max} - \Theta_{ЧЭ\min}} = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{ЧЭ\max} - \Theta_{ЧЭ\min}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что δ зависит от температурного перепада $\Delta\Theta$, который определяется не только изменениями $\Theta_{ЧЭ}$ ($\Theta_{ср}$), но и изменениями температуры $\Theta_{СТ}$, причем изменения могут быть весьма существенными в турбинах, где СТ, как правило, находится не на открытом воздухе вне статорной оболочки, а под кожухом в замкнутом пространстве. При этом величина первого множителя в выражении (5) может изменяться от 0 до 1.

Второй множитель ($R_1/(R_1 + R_2)$) всегда меньше 1, и его величина зависит от конструкции и размеров ТВ. Для упрощенного варианта ТВ (см. рис. 1) тепловые сопротивления

$$R_1 = \frac{l_1}{\lambda \cdot S}, R_2 = \frac{l_2}{\lambda \cdot S}, \quad (6)$$

где l_1, l_2 – длины рассматриваемых участков ТВ, $S = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2)$ – площадь сечения, а λ – коэффициент теплопроводности материала ТВ.

После подстановки R_1, R_2 (6) в выражение (5) можно записать

$$\delta = \frac{\Delta\Theta}{\Theta_{\text{ЧЭ max}} - \Theta_{\text{ЧЭ min}}} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Если изменения $\Delta\Theta$ происходят во всем диапазоне, а $l_1 \approx 0.1 \cdot l_2$ [1], то приведенная погрешность δ не превышает 10 %. В реальных конструкциях ОВТД с более тщательным учетом их особенностей и размеров погрешность может оказаться выше (до 20 % и более).

Метод уменьшения температурной погрешности. Предлагаемый метод уменьшения рассмотренной температурной погрешности предусматривает применение дополнительной ТП, встроенной в датчик, ГСп которой размещается в конце ТВ в месте контакта с вторичным витком СТ. Метод предусматривает также расчет температуры ЧЭ ($\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ср}}$) с помощью модели передачи тепла в ТВ и измеренных значений температур в точках размещения ГСп обеих ТП. Модель передачи тепла в ТВ датчика с двумя встроенными ТП приведена на рис. 3.



Рис. 3. Модель передачи тепла в ТВ с двумя встроенными ТП

Очевидно, что в соответствии с моделью передачи тепла (рис. 3) можно записать, что температура ЧЭ определяется температурой, измеренной ТП₁ ($\Theta_{\text{ТП1}}$), и перепадом температур между ЧЭ и ГСп ТП₁, т. е. перепадом температур на тепловом сопротивлении R_1 ($\Delta\Theta_{R1}$):

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + \Delta\Theta_{R1} = \Theta_{\text{ТП1}} + q \cdot R_1. \quad (8)$$

При этом тепловой поток q можно вычислить по перепаду температур на тепловом сопротивлении R_2 , найденному в результатах измерений ТП₁ и ТП₂:

$$q = \frac{\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}}{R_2}. \quad (9)$$

С учетом (9) выражение (8) примет вид

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

или, с учетом формул (6),

$$\Theta_{\text{ЧЭ}} = \Theta_{\text{ТП1}} + (\Theta_{\text{ТП2}} - \Theta_{\text{ТП1}}) \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (11)$$

Один из возможных вариантов технических средств системы, обеспечивающей получение информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток (х-, у-координатах), в котором реализуется предлагаемый метод, представлен на рис. 4.

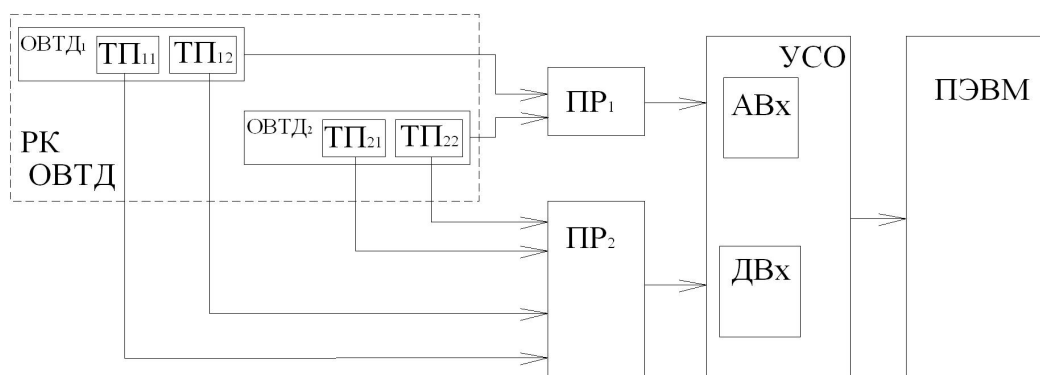


Рис. 4. Технические средства системы, реализующей предлагаемый метод

В состав технических средств входит нестандартное и фирменное оборудование. Нестандартное оборудование включает: РК из двух датчиков – ОВТД₁ с двумя встроенными термопарами ТП₁₁ и ТП₁₂, ОВТД₂ с термопарами ТП₂₁ и ТП₂₂, а также преобразователь (ПР₁) изменений индуктивностей ЧЭ обоих датчиков [2, 3].¹ Выходные напряжения ПР₁ подаются на аналоговые входы (АВх) устройства связи с объектом (УСО), где преобразуются в цифровые коды в АЦП и далее обрабатываются в ПЭВМ. В качестве УСО в рассматриваемом варианте системы можно использовать модули фирмы LCard, например E14-440.

Преобразователь ПР₂ ориентирован на сбор и обработку сигналов ТП, встроенных в ОВТД₁ и ОВТД₂ (ТП₁₁, ТП₂₁, ТП₁₂ и ТП₂₂ соответственно). Применение микропроцессорного устройства фирмы Rosemount 848Т [4] обеспечивает коммутацию, аналогово-цифровое преобразование, коррекцию температуры холодных спаев с помощью встроенного терморезистора, а также расчет физических значений температуры, которые вводятся на дискретные входы (ДВх) УСО.

Если информативными сигналами являются коды АЦП [2] в моменты прохождения торцами лопаток г. ц. и виртуального г. ц. РК ОВТД, то технические средства, приведенные на рис. 4, дополняются датчиком частоты вращения (ДЧВ) промышленного изготовления с формирователем, обеспечивающим измерение периода вращения лопаточного колеса и синхронизацию импульсов питания измерительной цепи ОВТД с меткой на валу компрессора или турбины.

Программное обеспечение системы построено на основе традиционных алгоритмов для рассматриваемого класса систем, которые включают, в частности, алгоритмы сбора измерительной информации, преобразования аналоговых сигналов в цифровые коды, предварительную обработку и вычисление координат смещений с термокоррекцией [2], причем существующие алгоритмы термокоррекции должны быть дополнены расчетом температуры ЧЭ, выполненным в соответствии с выражением (10) (или (11)) и предлагаемым методом.

Заключение. С помощью упрощенной модели передачи тепла в элементах конструкции существующих ОВТД получена количественная оценка температурной погрешности канала термокоррекции в системе сбора информации о координатах смещения торцов лопаток. Предложен метод уменьшения погрешности, предусматривающий применение дополнительной ТП, также встраиваемой в ОВТД, и расчет

¹ В РК происходит поочередная смена функций ОВТД₁ и ОВТД₂ с рабочих на компенсационные, и это позволяет использовать один преобразователь на два датчика.

температуры ЧЭ датчика по результатам измерения существующей и дополнительной ТП и модели передачи тепла. Рассмотрен один из возможных вариантов реализации предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
2. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Л.Б. Бельский, С.Ю.Боровик, Б.К. Райков и др.; Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
3. Бельский Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с уменьшением влияния некоторых мешающих факторов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIII Междунар. конф. – Самара: Изд.-во СамНЦ РАН, 2011. – С. 294-299.
4. www.rosemount.com – Rosemount 848T High Density Temperature Measurement Family

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2012 г.

THE INACCURACY OF MEASUREMENTS OF A SINGLE-COIL EDDY-CURRENT SENSOR DETECTING ELEMENT TEMPERATURE IN THERMO-COMPENSATION CHANNELS OF THE SYSTEM FOR INFORMATION ACQUISITION ABOUT BLADE TIPS MULTIDIMENSIONAL DISPLACEMENTS AND THE INACCURACY-REDUCTION TECHNIQUE

S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences
61, Sadovaya st., Samara, 443020

The article consider an analysis of the temperature error in the thermo-correction channel of the system for information acquisition about blade tips displacements. Quantitative estimates of this error are obtained and inaccuracy-reduction technique is proposed. A possible implementation of the proposed method is considered.

Keywords: *thermo-correction channel of the system, a distributed cluster of two single-coil eddy-current sensors, temperature error, the model of heat transfer, method of reducing the error.*

*Sergey Yurievich Borovik (Ph.D. (Techn.)), Leading Scientist.
Marina Mihailovna Kuteynikova, Engineer.
Yuriy Nikolaevich Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Director of Laboratory.
Oleg Petrovich Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Chief Scientist.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ «КЭШ-ПАМЯТЬ – ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ» МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Н.В. Ефимушкина, М.М. Ефремов, С.П. Орлов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Рассмотрены основные способы организации кэш-памяти современных вычислительных систем и принципы построения их моделей. С помощью имитационных моделей выполнен анализ наиболее важных временных характеристик подсистемы памяти и определены эффективные режимы ее работы.

Ключевые слова: имитационная модель, оперативная память, кэш-память, многопроцессорная система.

Введение. В настоящее время для согласования скоростей работы устройств вычислительных систем применяют иерархическую структуру памяти [1]. Для однопроцессорных систем достаточно подробно исследованы условия эффективной организации подсистемы «кэш-память – оперативная память» [2]. Однако для многоядерных процессоров и многопроцессорных систем довольно сложно получить аналитические решения, описывающие процессы обмена данными между уровнями памяти. В этом случае целесообразно использовать имитационное моделирование. В статье рассматривается объект моделирования – подсистема памяти компьютера и описаны результаты имитационного моделирования различных режимов работы.

Объект моделирования. Рассматривается многоуровневая структура памяти современного компьютера [3]. Она содержит четыре уровня: устройства кэш-памяти первого, второго и третьего уровня и оперативную память, находящуюся на нижнем уровне иерархии. При этом используется принцип локальности ссылок: программа и обрабатываемые ею данные обычно располагаются в последовательных ячейках памяти и образуют компактные области, а следующее обращение к памяти при выполнении программы с большой вероятностью происходит к тому же блоку данных, который находится в данный момент в памяти верхнего уровня. В процессе выполнения программы происходит активное взаимодействие памяти всех уровней. Результатом обращения к памяти верхнего уровня (кэш) может быть попадание или промах. Промах означает, что объект не найден в кэше, и его поиск будет продолжен на более низком уровне.

Поскольку повышение производительности является главной причиной иерархической организации памяти, частота попаданий и промахов является важной характеристикой. Время обращения при попадании есть время обращения к более высокому уровню иерархии. Оно включает в себя, в частности, и время, необходимое для определения результата (попадание или промах). Потери на промах – это время

Наталья Владимировна Ефимушкина (к.т.н.), доцент кафедры «Вычислительная техника».

Михаил Михайлович Ефремов, аспирант.

Сергей Павлович Орлов (д.т.н., профессор), заведующий кафедрой «Вычислительная техника».

для замещения блока более высокого уровня на блок из более низкого плюс время для пересылки этого блока в требуемое устройство (обычно в процессор). Описываемые потери включают в себя две компоненты: время доступа (время обращения к первому слову блока при промахе) и время пересылки оставшихся слов блока. Первая компонента связана с задержкой памяти более низкого уровня, в то время как время пересылки определяется полосой пропускания канала между устройствами памяти двух смежных уровней.

Память любого типа может иметь различные структуры и режимы функционирования. Определение оптимальных структур и режимов для различных классов программ и вычислительных систем является сложной задачей. В предлагаемой работе исследовалась наиболее важная подсистема «кэш – оперативная память». Физические эксперименты над этой подсистемой организовать весьма сложно, поэтому было принято целесообразным использовать метод имитационного моделирования. Метод является универсальным и позволяет исследовать системы любой сложности, с любыми режимами функционирования. При этом имеется возможность воспроизводить в модели наиболее важные особенности объекта и исключать второстепенные.

В современных вычислительных системах (ВС) используются три типа организации кэш-памяти [4]:

- а) кэш с прямым отображением (каждая строка кэша может содержать строку основной памяти только из определенного подмножества адресов, причем эти подмножества не пересекаются);

- б) полностью ассоциативный кэш (любая строка ОП может находиться в любой строке кэша);

- в) множественно-ассоциативный кэш (кэш-память делится на непересекающиеся подмножества). Каждая строка основной памяти может попасть в любое место только одного подмножества кэша.

При выполнении очередной команды процессор запрашивает операнд по некоторому адресу. Если соответствующая строка имеется в кэше, то происходит кэш-попадание, иначе – кэш-промах. В последнем случае возникает проблема замены некоторой строки в кэше на новую строку. Для этого предлагаются различные дисциплины замещения строк:

- 1) замещение строки, к которой дольше всего не обращались (алгоритм LRU – Least Recently Used);

- 2) вытеснение строки, которая была загружена раньше всех (алгоритм FIFO – First Input First Output);

- 3) замена наименее часто запрашиваемой строки (алгоритм LFU – Least Frequently Used);

- 4) замена случайной строки (Random-алгоритм).

Наиболее часто применяются две стратегии: случайный выбор Random и LRU.

В структуре кэш-памяти выделяют два типа блоков данных:

- а) отображения данных (собственно сами данные, дублированные из оперативной памяти);

- б) теги, содержащие признаки, указывающие на расположение кэшированных данных в оперативной памяти.

Пространство памяти отображения данных в кэше разбивается на строки – блоки фиксированной длины (например, 32, 64 или 128 байт). Каждая строка кэша может содержать непрерывный выровненный блок байт из оперативной памяти. Какой блок ОП отображен на данную строку кэша, определяется тегом строки и алгорит-

мом отображения. Именно по алгоритмам отображения оперативной памяти в кэш и выделяют три типа кэш-памяти, которые перечислены выше.

Для полностью ассоциативного кэша характерно, что кэш-контроллер может поместить любой блок оперативной памяти в любую строку кэш-памяти. В этом случае физический адрес разбивается на две части: смещение в блоке (строке кэша) и номер блока. При помещении блока в кэш его номер сохраняется в теге соответствующей строки. Когда процессор обращается к кэшу, промах будет обнаружен только после сравнения тегов всех строк с номером блока.

Одно из основных достоинств рассматриваемого способа отображения – хорошая возможность размещения больших массивов данных, т. к. нет ограничений на то, какой блок может быть отображен на ту или иную строку кэш-памяти. При этом сокращается количество промахов. К недостаткам относят сложную аппаратную реализацию этого способа, требующую большого количества схем (в основном компараторов), что приводит к увеличению времени доступа к кэшу и увеличению его стоимости.

Альтернативный способ используется в кэше прямого отображения. В нем адрес памяти (номер блока) однозначно определяет строку кэша, в которую будет помещен данный блок. Физический адрес разбивается на три части: смещение в блоке (строке кэша), номер строки кэша и тег. Тот или иной блок будет всегда помещаться в строго определенную строку кэша, при необходимости заменяя собой хранящийся там другой блок. Если процессор обращается к кэшу за данными, достаточно проверить тег лишь одной строки.

Очевидными преимуществами описываемой структуры являются простота и дешевизна реализации. К недостаткам следует отнести низкую эффективность такого кэша из-за возможных частых перезагрузок строк.

Компромиссным вариантом между первыми двумя структурами является множественный ассоциативный или частично-ассоциативный кэш. При этом способе организации кэш-памяти строки объединяются в группы, в которые могут входить 2, 4, ... строк. В соответствии с количеством строк в таких группах различают 2-входовый, 4-входовый и т. п. ассоциативный кэш.

При обращении к памяти физический адрес разбивается на три части: смещение в блоке (строке кэша), номер группы (набора) и тег. Блок памяти, адрес которого соответствует определенной группе, может быть размещен в любой строке этой группы, и в теге строки размещается соответствующее значение. Очевидно, что в рамках выбранной группы соблюдается принцип ассоциативности. С другой стороны, тот или иной блок может попасть только в строго определенную группу, что перекликается с принципом организации кэша прямого отображения. Для того чтобы процессор смог идентифицировать кэш-промах, ему надо будет проверить теги лишь одной группы (2/4/8/ строк).

Описанный алгоритм отображения сочетает достоинства как полностью ассоциативного кэша (хорошее использование памяти и высокая скорость), так и кэша прямого отображения (простота и дешевизна), лишь незначительно уступая по перечисленным характеристикам исходным структурам. Именно поэтому множественный ассоциативный кэш получил наиболее широкое распространение.

Критерием эффективной работы кэша можно считать уменьшение среднего времени доступа к памяти по сравнению с системой без него. В таком случае среднее время доступа можно оценить следующим образом:

$$T_{cp} = (T_{hit} \times R_{hit}) + (T_{miss} \times (1 - R_{hit})),$$

где T_{hit} – время доступа к кэш-памяти в случае попадания (включает время на иден-

тификацию промаха или попадания);

T_{miss} – время, необходимое на загрузку блока из основной памяти в строку кэша в случае кэш-промаха и последующую доставку запрошенных данных в процессор;

R_{hit} – частота попаданий.

Очевидно, что чем ближе значение R_{hit} к 1, тем ближе значение T_{cp} к T_{hit} . Частота попаданий определяется в основном архитектурой кэш-памяти и ее объемом. Влияние этого фактора на рост производительности процессора иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1

Размер и эффективность кэш-памяти

Размер кэш-памяти, Кб	Частота попаданий, %	Рост производительности, %
Нет кэш-памяти	–	0
16	81	35
32	86	38
64	88	39
128	89	39

Кэш первого уровня является составной частью всех современных CPU. Кэш второго уровня (L2) начали использовать на всех процессорах после выхода Pentium III. Современные процессоры оснащаются до 6 Мбайт кэш-памяти L2 на кристалле. Она разделяется между двумя ядрами, например процессора Intel Core 2 Duo.

Кэш третьего уровня стал применяться в процессорах Intel Itanium 2, Pentium 4 Extreme и Xeon MP. Современные архитектуры используют L3 как большой общий буфер для обмена данными между ядрами в многоядерных процессорах. Современные четырехъядерные процессоры имеют выделенные кэши L1 и L2 для каждого ядра, а также большой кэш L3, являющийся общим для всех ядер.

Имитационное моделирование подсистемы «кэш-память – оперативная память». Типичным для памяти современных ВС является набор характеристик, приведенных в табл. 2. С помощью программ имитационного моделирования, разработанных авторами [5, 6, 7], проведены исследования структур подсистем всех описанных типов.

Таблица 2

Типичные характеристики современной кэш-памяти

Наименование	Значение
Размер блока (строки)	4-128 байт
Время попадания (hit time)	1-4 такта синхронизации (обычно 1 такт)
Потери при промахе (miss penalty): – время доступа (access time) – время пересылки (transfer time)	8-32 такта синхронизации: – 6-10 тактов синхронизации; – 2-22 такта синхронизации
Доля промахов (miss rate)	1 – 20 %
Размер кэш-памяти	4 Кбайт – 16 Мбайт

Графики зависимости между основными параметрами и характеристиками памяти для однопроцессорной ВС приведены на рис. 1, а, рис. 1, б и рис. 2. Длина

последовательности команд – 1000 простых команд, объем кэша измерялся в килобайтах. Время выполнения определяется количеством машинных тактов.

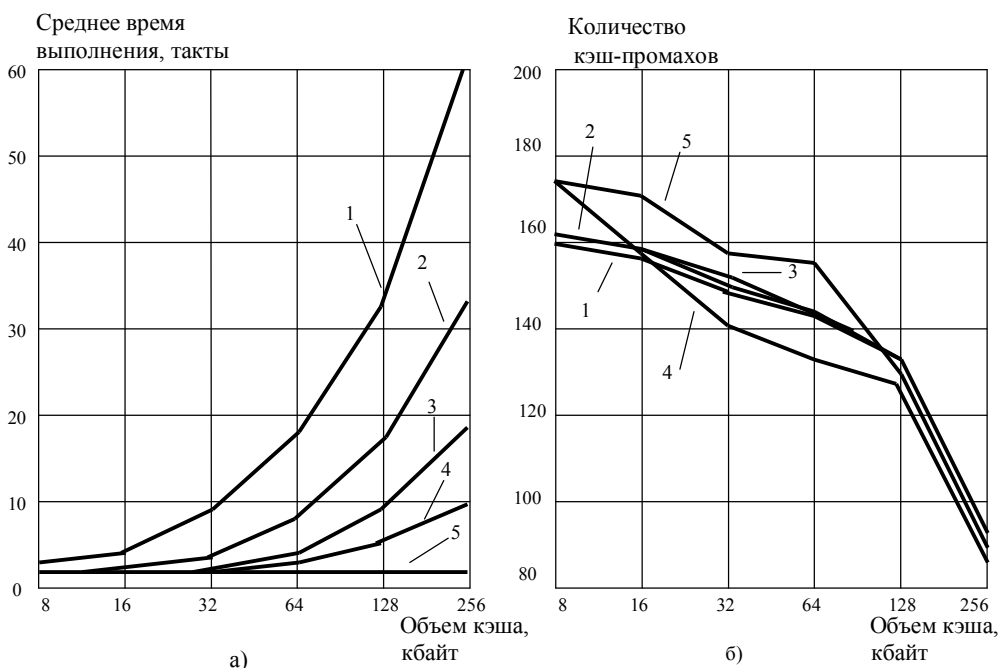


Рис. 1. Зависимость параметров обмена данными от объема кэш памяти:
а) среднее время выполнения команды; б) количество кэш-промахов;
1 – кэш с прямым отображением; 2 – полностью ассоциативный кэш; 3 – множественно-ассоциативный кэш с двумя подмножествами; 4 – множественно-ассоциативный кэш с четырьмя подмножествами; 5 – множественно-ассоциативный кэш с восемью подмножествами

Анализ графиков показывает, что модели адекватно воспроизводят процесс функционирования подсистемы «кэш – оперативная память». Наивысшую производительность и наилучшие временные характеристики обеспечивает полностью ассоциативный кэш, худшие – устройство с прямым отображением, а множественно-ассоциативный кэш занимает промежуточное положение. Методы замещения строк имеют близкие характеристики, за исключением алгоритма LFU, который является самым неэффективным.

Принцип локальности ссылок при однопрограммном режиме работы процессоров приводит к тому, что в кэшах любого типа массивы данных из оперативной памяти занимают соседние блоки. Поэтому число промахов зависит только от объема кэша. Исследования на модели подтвердили, что у всех трех типов кэш-памяти количества кэш-промахов имеют близкие значения. Размер обрабатываемого массива данных (параметр «длина цикла» на рис. 3, а) практически не влияет на среднее время выполнения команды и количество кэш-промахов до тех пор, пока он не превысит объем кэш-памяти. В последнем случае число промахов резко возрастает, так как при каждом повторении цикла обработки приходится подкачивать часть данных, которые не поместились в кэш.

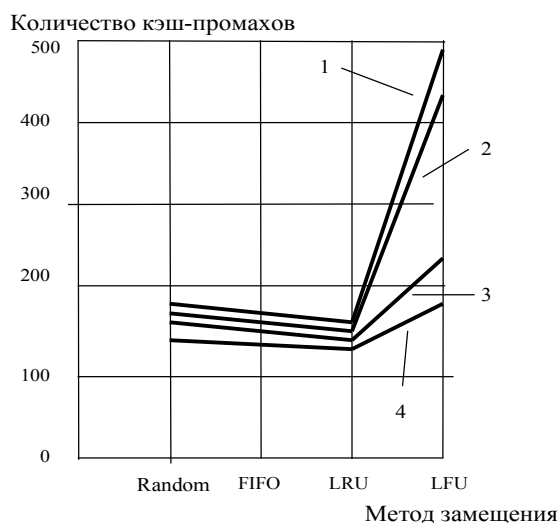


Рис. 2. Зависимость количества промахов от вида кэша и метода замещения строк:
 1 – полностью ассоциативный кэш; 2 – множественно-ассоциативный кэш с двумя подмножествами; 3 – множественно-ассоциативный кэш с четырьмя подмножествами;
 4 – множественно-ассоциативный кэш с восемью подмножествами

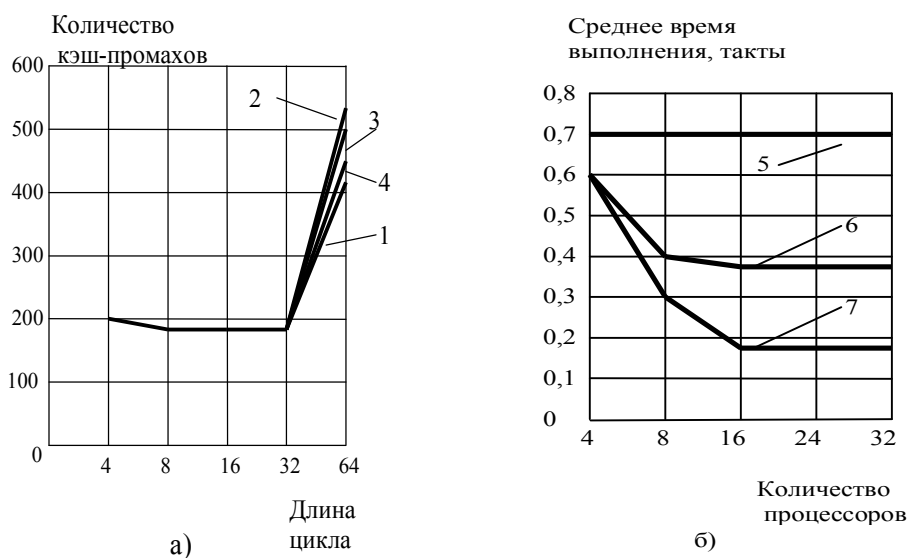


Рис. 3. График зависимости: а) количества кэш-промахов от длины цикла; б) среднего времени выполнения команды от количества процессоров;
 1 – кэш с прямым отображением; 2 – полностью ассоциативный кэш; 3 – множественно-ассоциативный кэш с двумя подмножествами (двухканальный); 4 – множественно-ассоциативный кэш с четырьмя подмножествами (четырёхканальный); 5 – кэш и локальная память ЛП; 6 – только кэш-память; 7 – нет кэш-памяти

Графики зависимости между основными параметрами и характеристиками для многопроцессорной вычислительной системы приведены на рис. 3, б. Здесь через ЛП обозначена локальная память (кэш уровня L3). Анализ графиков показывает, что наиболее эффективной является трехуровневая организация памяти, включающая в себя кэш, локальную и общую память. Из рис. 3, б следует, что с ростом числа цен-

тральных процессоров от 4 до 16 увеличивается количество одновременно выполняемых команд, что приводит к уменьшению среднего времени выполнения одной команды. При числе процессоров от 16 до 32 и более узким местом становится системная шина. Поэтому дальнейший рост количества процессоров не приводит к увеличению производительности вычислительной системы.

Заключение. Методика имитационного моделирования многоуровневой памяти может быть использована при проектировании управляющих систем на основе компьютеров с многоядерными процессорами. Имитационные модели памяти также эффективны при изучении свойств кэш-памяти в специальных дисциплинах бакалавриата по направлению 230100 «Информатика и вычислительная техника».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Столлингс В. Структурная организация и архитектура компьютерных систем: Пер. с англ. – Изд. 5-е. – М.: Вильямс, 2002. – 896 с.
2. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 668 с.
3. Таненбаум Э. Архитектура компьютера: пер. с англ. – Изд. 5-е. – СПб., 2010. – 848 с.
4. Хамакер К., Вранешич З., Заки С. Организация ЭВМ: пер. с англ. / Сер. Классика computer science. – Изд. 5-е. – СПб: Питер, 2003. – 845 с.
5. Ефимушкина Н.В., Орлов С.П. Вычислительные системы и комплексы: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 268 с.
6. Ефремов М.М. Имитационные модели для исследования подсистемы памяти современных вычислительных систем // Сборник тезисов докладов участников XXIV Всероссийской конференции обучающихся «Национальное достояние России». – Минобрнауки РФ, Рособразование, РОСКОС-МОС, РАО, НС «ИНТЕГРАЦИЯ», 2009. – 1428 с. – С. 363-364.
7. Ефремов М.М. Методы изучения подсистем памяти современных вычислительных систем // Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых ученых: Всероссийская научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов, 4-6 ноября 2009 г., г. Рязань / Отв. ред. А.Н. Козлов; Ряз. гос. ун-т им. Есенина. – Рязань, 2009. – 434 с. – С. 143-145.

Статья поступила в редакцию 24 октября 2011 г.

RESEARCH SUBSYSTEM «CACHE-MEMORY – RANDOM ACCESS MEMORY» IN MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS

N.V. Efimushkina, M.M. Efremov, S.P. Orlov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The main ways of organizing memory cache of modern computational systems and the principles of their models are considered. Proposed simulation models to analyze the most important temporal characteristics of the memory subsystem and identifies effective modes of operation.

Keywords: *simulation modeling, random access memory, cache, multiprocessor computer systems.*

*Natalia V. Efimushkina (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Michail M. Efremov, Postgraduate student.
Sergey P. Orlov (Dr. (Techn.)), Professor.*

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

К.Л. Куликовский¹, А.Н. Толокнова²

¹Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Самарская государственная сельскохозяйственная академия
443056, г. Самара, пр. Масленникова, 37

E-mail: ant683@mail.ru

Проведен анализ способности водоема к естественному самоочищению, выявлены основные параметры, определяющие способность водоема к естественному самоочищению, представлена структура информационно-измерительной системы, реализующая перспективное прогнозирование экологического состояния водоема.

Ключевые слова: *перспективное прогнозирование, самоочищение водоема, структура информационно-измерительной системы, период самоочищения, коэффициент способности водоема к самоочищению.*

Введение. Перспективное прогнозирование экологического состояния водоема – это прежде всего определение тенденции изменения экологической ситуации внутри водоема при постоянном или увеличивающемся уровне антропогенного воздействия.

Прогноз состояния водных экосистем крайне важен при перспективном планировании рациональной эксплуатации водной среды с целью обеспечения различных звеньев народнохозяйственной отрасли. Для решения поставленной задачи необходимо проведение экологического мониторинга.

В настоящее время экологический мониторинг водных объектов, расположенных на территории РФ, осуществляется на основании стандартных химических, бактериологических и биологических анализов. Существуют различные методики оценки качества вод пресноводных водоемов. Например, методика оценки качества водоемов по комплексу гидрохимических показателей, методика оценки качества водоемов по данным гидробиологического анализа, методики комбинированных оценок качества воды с использованием гидрохимических и гидробиологических показателей и т. д.

Наиболее распространенными в настоящее время критериями оценки качества поверхностных вод суши являются предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ. Также в качестве интегральной характеристики загрязнения воды применим индекс загрязненности вод (ИЗВ). Но в настоящее время при достаточно широком спектре токсикологических загрязняющих веществ такая оценка качества поверхностных вод по ИЗВ является неполной. Поэтому для оценки уровня загрязненности воды используются такие комплексные показатели, как удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) и класс качества воды.

Таким образом, сформировавшийся в современном экологическом мониторинге

¹ Константин Лонгинович Куликовский (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

² Анна Николаевна Толокнова (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Организация перевозок и технического сервиса».

подход дает возможность выявления состояния водоема на данный момент без возможности перспективной оценки процессов, происходящих в водоеме.

Потому возникла необходимость преобразования современной системы контроля качества вод в перспективный экологический мониторинг, позволяющий оценивать и выявлять тенденции в изменении состояния водоема. Решение этой проблемы неразрывно связано с необходимостью прогнозирования, т. е. построения предположения относительно поведения водной экологической среды, основанного на изучении естественных процессов, происходящих в данной среде, и процессов взаимодействия данной среды с другими средами, включая антропогенную [1].

Перспективное прогнозирование экологического состояния водоема. Одной из главных задач перспективного мониторинга является поиск интегрального чувствительного критерия оценки состояния экосистемы. Определение такого критерия позволит оценивать воздействие общей антропогенной нагрузки без определения влияния каждого отдельно взятого загрязнителя. Необходимо найти такой критерий, который будет характеризовать динамику совокупных процессов, происходящих в водной экосистеме. Исследования показали [2], что таким критерием является способность водной экологической системы к самоочищению.

Способность водоема к самоочищению (СВС) – это способность водной экосистемы принимать, перерабатывать и удалять вещества природного и антропогенного происхождения. Изучение данной способности дает понимание перспектив того или иного водоема.

Способность экосистемы водного объекта к самоочищению зависит от способности донного осадка к самоочищению.

Было установлено [2], что параметром, наиболее ярко отображающим протекание, активность и сбалансированность биогеохимических процессов на последней стадии переработки органических остатков и загрязнений в донных осадках, является напряженность окислительно-восстановительных условий. Окислительно-восстановительными условиями определяется геохимическая обстановка водоема в целом, возможность элементов мигрировать или осаждаться в той или иной форме.

В слое донного осадка постоянно протекают процессы окисления и восстановления. Протекание процесса окисления обусловлено присутствием достаточного количества кислорода: чем больше кислорода, тем процесс окисления интенсивнее. Процесс восстановления, наоборот, связан с уменьшением содержания кислорода. Каждый из этих процессов можно рассматривать отдельно. Однако учитывая что, эти процессы взаимозависимы, т. е. один без другого не протекает, рассматривать окисление и восстановление необходимо как единый процесс.

Окислительно-восстановительный потенциал характеризует протекание процесса окисления-восстановления. Чем выше значение окислительно-восстановительного потенциала, тем интенсивнее протекает процесс окисления, тем интенсивнее идет процесс восстановления.

От окислительно-восстановительного потенциала зависит мера химической активности элементов или их соединений в обратимых химических процессах, связанных с изменением заряда ионов в растворах. В природных водоемах значение Eh в слое донного осадка колеблется от минус 350 до плюс 650 мВ и определяется всей совокупностью происходящих в нем окислительных и восстановительных процессов.

Способность экосистемы водного объекта к самоочищению, зависящая от способности донного осадка к самоочищению, определяется распределением окислительно-восстановительного потенциала Eh и температуры $t^{\circ}C$ в осадке и его тол-

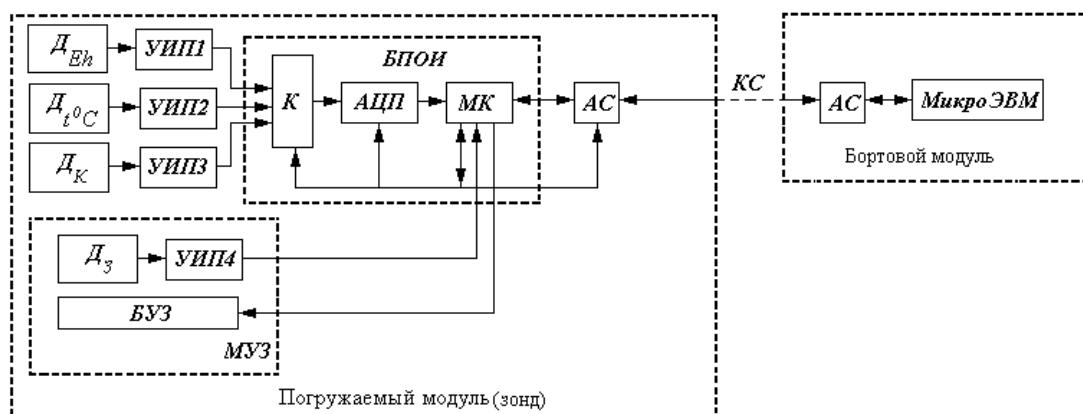
щиной h [2]:

$$CBC(Eh, t^0C, h). \quad (1)$$

В данной модели интегральным параметром, комплексно характеризующим способность водоема к самоочищению, является распределение окислительно-восстановительного потенциала Eh в верхнем слое донных осадков глубиной до 10 см. Окислительно-восстановительный потенциал Eh и его пространственное распределение описывают напряженность окислительно-восстановительных условий биогеохимических процессов на последней стадии переработки органических остатков и загрязнений в донном осадке. Донный осадок, являясь последним звеном в сложной цепи очистки, служит последним рубежом защиты водоема от негативного воздействия всех поступающих веществ. Толщина защитного слоя донного осадка h уменьшается по мере увеличения антропогенной нагрузки. Кроме того, температура является важнейшим фактором, влияющим на протекающие в водоеме физические, химические, биохимические и биологические процессы, от которого в значительной мере зависят кислородный режим и, главное, интенсивность процессов самоочищения [3].

Данная модель дает основания к построению гидрологических информационно-измерительных систем (ИИС) перспективного прогнозирования состояния водных экосистем.

Информационно-измерительная система перспективного прогнозирования состояния водных экосистем. Обобщенную структурную схему донной ИИС определения способности экосистемы водного объекта к самоочищению можно представить следующим образом (см. рисунок).



Обобщенная структурная схема донной ИИС определения способности экосистемы водного объекта к самоочищению

ИИС состоит из двух частей: надводной и погружаемой. Надводная часть реализована в виде бортового модуля на базе микро-ЭВМ с программным обеспечением для обработки и представления информации в реальном времени, создания и ведения базы экспериментальных данных.

Погружаемый модуль (зонд) соединен с бортовым модулем каналом связи КС, представляющим собой кабель. Адаптеры связи АС обеспечивают связь бортового и погружаемого модулей.

В состав зонда, устанавливаемого для измерений на поверхности дна исследуемого водоема, входят датчик окислительно-восстановительного потенциала D_{Eh} ,

датчик температуры D_{T^0C} , датчик крена D_K , унифицирующие измерительные преобразователи $УИП1 - УИП3$, модуль управления заглублением $МУЗ$ и блок предварительной обработки информации $БПОИ$, представляющий собой совокупность коммутатора K , аналого-цифрового преобразователя $АЦП$ и микроконтроллера $МК$.

Модуль управления заглублением $МУЗ$ в структуре донной ИИС предусмотрен для обеспечения внедрения измерительных элементов в слой донного осадка. Он включает в себя датчик заглубления D_3 , унифицирующий измерительный преобразователь $УИП4$ и блок управления заглублением $БУЗ$, осуществляющий механическое внедрение измерительных элементов в донный ил.

Информация об измеренных значениях окислительно-восстановительного потенциала, температуры и угла крена после преобразования в электрические сигналы, усиления, преобразования в цифровую форму для повышения помехоустойчивости посредством адаптера связи в последовательном двоичном коде поступает по линии связи на адаптер связи бортового модуля.

Блок первичной обработки информации $БПОИ$ обеспечивает сбор аналоговой информации, поступающей с датчиков, и ее преобразование в сигналы соответствующих уровней, которые посредством адаптеров связи и канала связи поступают на *микро-ЭВМ* для обработки.

Управление работой цифровых и механических блоков зонда осуществляется микроконтроллером по заданной программе.

Микро-ЭВМ, получая информацию от зонда, осуществляет ее обработку, автоматическую коррекцию погрешностей, запоминание, документирование, а также отображает информацию на экране. Визуальное представление полученных данных осуществляется в виде числовой индикации и кривых зависимостей. *Микро-ЭВМ* обеспечивает работу в автоматическом режиме системы в целом посредством обработки управляющих и корректирующих воздействий.

Операции спуска, подъема и установки зонда на поверхности дна водоема осуществляются оператором вручную. Чтобы данные операции не осуществлялись оператором «вслепую», необходимо использование устройства эхолокации, которое позволяет определять расстояние до поверхности дна, а также его профиль. Это позволит оператору устанавливать зонд вертикально на относительно ровных участках дна.

Одной из особенностей гидрологических исследований является необходимость проведения измерений в одной и той же точке исследуемого водного объекта в разные периоды времени. Использование устройства позиционирования позволит определять координаты точек измерительного эксперимента, которые можно заносить в память *микро-ЭВМ*, и в дальнейшем на их основании строить карты исследуемого водоема. В качестве таких устройств используют GPS-приемники.

Безусловным преимуществом данной структуры ИИС является возможность относительно легкой ее модификации путем введения в состав погружаемой части системы дополнительных каналов измерения гидрохимических характеристик (например, электропроводимость, pH, соленость и т. д.). Это позволяет свободно адаптировать измерительную систему к решению различных задач измерения.

Процедура вычисления коэффициента способности водоема к самоочищению k_{SPA} по измеренным значениям потенциала, температуры и угла отклонения осуществляется по следующему алгоритму.

1. Проводят измерения потенциала E_i , температуры t_i и угла отклонения α_i в каждой i -ой точке.

2. Определение глубины внедрения датчика Eh в слой донного осадка h_i' осуществляется в $(i-1)$ точке.
3. Полученное значение температуры должно находиться в диапазоне от 0 до плюс 35 °С. Если условие не выполняется, то на монитор бортового модуля выводится сообщение «Значение температуры вне исследуемого диапазона» и процедура завершается. Если условие выполняется, то процедура продолжается.
4. Вычисляется значение окислительно-восстановительного потенциала Eh_i .
5. По формуле $h_i = h_i' \cdot \cos \alpha_i$ вычисляется значение реальной толщины защитного слоя донного осадка h_i .
6. При выполнении условия $Eh_i > 0$ находят произведения $(Eh_i \cdot h_i)$ и их суммируют. По окончании процедуры измерения ($i=n$) находится значение a как среднее произведений $(Eh_i \cdot h_i)$, рассчитывается коэффициент способности водоема к самоочищению k_{CBC} по формуле [2]

$$k_{CBC} = \frac{a}{6500} . \quad (2)$$

7. Если условие не выполняется, то проверяется значение реальной толщины донного осадка h_i . Если $h_i < 10$ мм, то экосистема водоема считается погибшей ($k_{CBC}=0$); если условие не выполняется, то рассчитывается k_{CBC} .
8. Полученные значения k_{CBC} интерпретируют в соответствии с таблицей.

Способность водоема к самоочищению в зависимости от коэффициента k_{CBC}

Способность водоема к самоочищению	h	k_{CBC}	t_{CBC}^*
Нулевая (экосистема водоема погибла)	(0; 1)	Не существует	–
Критическая	(0; 1)	$< 0,015$	–
Низкая	(0; 2)	0,015-0,2	Более 25 лет
Ограниченная	(2; 7)	0,2-0,46	10 – 25
Высокая	(7; 10)	$> 0,46$	Менее 10 лет

* t_{CBC} – период самоочищения водоема.

В качестве частного случая можно рассматривать ситуацию, когда в водоеме общая толщина защитного слоя донного осадка менее 10 см. Тогда необходимо внести коррекцию в процедуру измерения и в методику определения коэффициента способности водоема к самоочищению.

Измерения в заданной точке необходимо проводить несколько раз с небольшим смещением зонда. Это позволит выяснить истинную толщину защитного слоя донного осадка как среднее значение (позволяет избежать ошибки при возникновении препятствий в виде камней или мусора) и при расчете коэффициента способности к самоочищению учитывать его.

Предложенная информационно-измерительная система способна работать в водоемах глубиной до 15 м. Измерение окислительно-восстановительного потенциала осуществляется в диапазоне от минус 350 мВ до плюс 650 мВ, температуры – от 0 °С до плюс 35 °С. Максимальная толщина донного осадка, в который заглубляется измерительный элемент, составляет 10 см, максимальный угол отклонения заглубления датчика Eh от вертикали составляет 5°. Погрешность донной ИИС определения

СВС в основном зависит от погрешности измерения окислительно-восстановительного потенциала и составляет 0,5 %.

Безусловным преимуществом описанной структуры ИИС является возможность относительно легкой ее модификации путем введения в состав погружаемой части системы дополнительных каналов измерения гидрохимических характеристик (например, электропроводимости, рН, солености и т. д.). Это позволяет свободно адаптировать измерительную систему к решению различных задач измерения.

Заключение. Донная информационно-измерительная система определения способности экосистемы водоема к самоочищению предназначена для прогнозного оценивания способности водной экосистемы противостоять антропогенному воздействию со стороны промышленных предприятий. Данное оценивание осуществляется посредством определения коэффициента способности водоема к самоочищению. Коэффициент учитывает такие важные в процессе естественного самоочищения водоема параметры, как распределение окислительно-восстановительного потенциала в защитном слое донного осадка, его толщина и температурный режим. Измерение этих параметров осуществляется ИИС непосредственно в водоеме без взятия пробы, что повышает достоверность получаемых результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токарев В.Г., Трибрат И.Н. Прогнозирование экологических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986.
2. Толокнова А.Н. Донная информационно-измерительная система определения способности водоемов к самоочищению: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук. – Самара: СамГТУ, 2007.
3. Куликовский К.Л., Толокнова А.Н. Построение прогнозной модели способности водных экосистем к самоочищению // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы XXIII Международной науч.-техн. конф., г. Москва, 2006. – Т. 2. – С. 263-265.

Статья поступила в редакцию 23 мая 2011 г.

AN INFORMATION MEASURING SYSTEM FOR PERSPECTIVE FORECASTING FOR THE STATE OF A WATER ECOSYSTEM

K.L. Kylikovsky¹, A.N. Toloknova²

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

²Samara State Agricultural Academy
37, Maslennikov pr., Samara, 443056

This article analyzes the natural self-purification ability of a body of water. The key parameters that determine the self-purification ability have been found. The structure of information measuring system is presented making possible perspective forecasting for the state of a body of water environment.

Keywords: *perspective forecasting, reservoir self-purification, the structure of information measuring system, the self-cleaning period, factor of ability of a reservoir to self-purification.*

*Konstantin L. Kylikovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anna N. Toloknova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАЗЦОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБРАТНЫХ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

В.Я. Купер¹, М.Г. Рубцов²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ООО «Научно-производственный центр ПАЛС»
443095, г. Самара, ул. Ташкентская, 196

E-mail: mg.rubtsov@mail.ru

Рассматриваются методы повышения точности измерений на основе обратных математических моделей измерительного канала, в качестве которых используются интерполяционные полиномы Лагранжа. Анализируются основные составляющие погрешности результата измерений при использовании методов образцовых сигналов и обратных интерполяционных моделей, решается задача оптимального выбора значений образцовых величин.

Ключевые слова: повышение точности измерений, погрешность измерений, измерительный канал, интерполяционный полином, методы образцовых сигналов.

В работе [1] рассмотрены алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей измерительного канала, показаны их достоинства и перспективность применения как для линейных, так и для нелинейных моделей функции преобразования средств измерений. Настоящая работа посвящена метрологическому анализу методов образцовых сигналов, в которых используются обратные интерполяционные модели, и оптимальному выбору значений образцовых сигналов.

Если обратный интерполяционный полином Лагранжа имеет порядок n , то оценка значения измеряемой величины вычисляется по формуле [1]

$$X = \sum_{j=0}^n \frac{\prod_{\substack{i=0; j=0 \\ i \neq j}}^n (Y_x - Y_i)}{\prod_{\substack{i=0; j=0 \\ i \neq j}}^n (Y_j - Y_i)} \cdot M_j, \quad (1)$$

где X – значение измеряемой величины;

M_j – значения образцовых величин;

j – номер узла интерполяции;

Y_x – значение выходной величины измерительного канала, соответствующее значению X на его входе;

Y_i, Y_j – значения выходной величины в узлах интерполяции;

n – порядок интерполяционного полинома.

Виталий Яковлевич Купер (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Михаил Геннадьевич Рубцов (к.т.н.), директор.

Наиболее часто на практике используются интерполяционные полиномы второго порядка ($n=2$). Тогда формула (1) принимает вид

$$X = L_0(Y_X) \cdot M_0 + L_1(Y_X) \cdot M_1 + L_2(Y_X) \cdot M_2, \quad (2)$$

где
$$L_0(Y_x) = \frac{(Y_X - Y_1) \cdot (Y_X - Y_2)}{(Y_0 - Y_1) \cdot (Y_0 - Y_2)};$$

$$L_1(Y_x) = \frac{(Y_X - Y_0) \cdot (Y_X - Y_2)}{(Y_1 - Y_0) \cdot (Y_1 - Y_2)};$$

$$L_2(Y_x) = \frac{(Y_X - Y_0) \cdot (Y_X - Y_1)}{(Y_2 - Y_0) \cdot (Y_2 - Y_1)}.$$

В этом случае выполняют последовательно четыре измерения: измеряемой величины X и трех образцовых величин M_0, M_1, M_2 . Соответствующие результаты измерений обозначены Y_x, Y_0, Y_1, Y_2 . Оценка значения измеряемой величины X вычисляется по формуле (2) и не зависит от параметров функции преобразования измерительного канала, что и обеспечивает повышение точности измерений.

Точность оценки значения измеряемой величины X определяется главным образом точностью образцовых величин M_0, M_1, M_2 , отклонением используемой интерполяционной модели от реальной функции преобразования средства измерений и случайными погрешностями значений Y_x, Y_0, Y_1, Y_2 выходной величины. Проанализируем каждую из указанных составляющих погрешности.

Анализ погрешности из-за неточности образцовых сигналов. Из формулы (1) следует, что если значения образцовых величин M_j имеют абсолютные погрешности ΔM_j , то соответствующая абсолютная погрешность оценки значения измеряемой величины ΔX_M равна

$$\Delta X_M = \sum_{j=0}^n L_j(Y_X) \cdot \Delta M_j. \quad (3)$$

В частности, для интерполяционного полинома второго порядка получим

$$\Delta X_M = L_0(Y_X) \cdot \Delta M_0 + L_1(Y_X) \cdot \Delta M_1 + L_2(Y_X) \cdot \Delta M_2.$$

В большинстве случаев практики при анализе данной составляющей погрешности можно пренебречь нелинейностью функции преобразования средства измерений. Тогда формула (3) примет вид

$$\Delta X_M = \sum_{j=0}^n \rho_j \cdot \Delta M_j, \quad (4)$$

где
$$\rho_j = \frac{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (X - M_i)}{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n (M_j - M_i)}.$$

Таким образом, погрешность ΔX_M равна сумме ΔM_j с весами ρ_j , причем

$$\sum_{j=0}^n \rho_j = 1.$$

Анализ формулы (4) показывает, что в узлах интерполяции ($X = M_j$) погрешность ΔX_M равна погрешности соответствующего образцового сигнала, т. е. $\Delta X_M = \Delta M_j$, а в других точках диапазона измерений равна взвешенной сумме погрешностей образцовых сигналов.

Анализ погрешности из-за отличия интерполяционной модели от реальной функции преобразования средства измерений. Из теории интерполирования функций известно [2], что при использовании интерполяционной формулы Лагранжа абсолютная величина погрешности интерполяции для обратной интерполяционной модели не превышает значения

$$\Delta X_{инт} \leq \frac{\max |f^{(n+1)}(Y)|}{(n+1)!} \cdot \left| \prod_{n+1}(Y) \right|, \quad (5)$$

где $\Delta X_{инт}$ – абсолютная величина погрешности интерполяции;

n – порядок интерполяционного полинома;

$f^{(n+1)}(Y)$ – производная $(n+1)$ -го порядка обратной функции преобразования средства измерений;

$$\prod_{n+1}(Y) = (Y_x - Y_0) \cdot (Y_x - Y_1) \cdot \dots \cdot (Y_x - Y_n). \quad (6)$$

Если используется модель 2-го порядка ($n=2$), то формула (5) принимает вид

$$\Delta X_{инт} \leq \frac{\max |f^{(3)}(Y)|}{6} \cdot \left| (Y_x - Y_0) \cdot (Y_x - Y_1) \cdot (Y_x - Y_2) \right|.$$

Учитывая монотонность реальной функции преобразования средств измерений, можно считать, что при использовании модели второго порядка действительная обратная функция преобразования удовлетворительно описывается степенным полиномом 3-го порядка

$$x = a_0 + a_1 \cdot Y + a_2 \cdot Y^2 + a_3 \cdot Y^3.$$

Тогда

$$\max |f^{(3)}(Y)| = 6 \cdot |a_3|, \text{ а } \Delta X_{инт} \leq |a_3| \cdot \left| (Y_x - Y_0) \cdot (Y_x - Y_1) \cdot (Y_x - Y_2) \right|. \quad (7)$$

В узлах интерполяции $x = M_0; x = M_1; x = M_2$ значения выходной величины Y_x равны соответственно Y_0, Y_1, Y_2 , следовательно, по формуле (7) погрешность интерполяции в узлах интерполяции равна нулю.

Для оценки погрешности интерполяции во всем диапазоне измерений необходимо проанализировать функцию (6). Пусть диапазон изменения измеряемой вели-

чины составляет $[x_{\min}; x_{\max}]$. Соответствующий диапазон изменения выходной величины $[Y_{\min}; Y_{\max}]$. Предположим, что $M_0 = x_{\min}; M_2 = x_{\max}$, тогда $Y_0 = Y_{\min}; Y_2 = Y_{\max}$.

Введем безразмерную выходную величину $Y^* = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}$, которая в диапазоне измерений изменяется в пределах $[0; 1]$. Тогда $Y_0^* = 0; Y_2^* = 1$, а $Y_1^* = \alpha$, причем $\alpha \in [0; 1]$. Выходной величине Y_x будет соответствовать нормированное значение $Y_x^* \in [0; 1]$.

Введем обозначение $D_Y = Y_{\max} - Y_{\min}$ – диапазон изменения выходной величины. Тогда формулу (7) можно представить в виде

$$\Delta X_{\text{инт}} \leq |a_3| \cdot D_Y^3 \cdot |Y_x^* \cdot (Y_x^* - \alpha) \cdot (Y_x^* - 1)|. \quad (8)$$

Функция (8) равна нулю при $Y_x^* = 0; Y_x^* = \alpha; Y_x^* = 1$ и имеет два экстремума (максимума) при

$$Y_x^* = \frac{1}{3} \cdot [(1 + \alpha) \pm \sqrt{(1 + \alpha)^2 - 3 \cdot \alpha}]. \quad (9)$$

Подставив формулу (9) в (8), получим верхний предел погрешности интерполяции. На практике обычно принимают $\alpha = 0,5$. При этом экстремумы функции (8)

имеют место при $Y_x^* = \frac{1}{2} \cdot (1 \pm \frac{1}{\sqrt{3}})$. В обеих точках экстремума погрешность интерполяции не превышает $\Delta X_{\text{инт}} \leq \frac{|a_3| \cdot D_Y^3}{12 \cdot \sqrt{3}}$.

Значение коэффициента a_3 определяется экспериментально путем проведения активного регрессионного эксперимента и построения обратной модели в виде степенного полинома 3-го порядка.

Анализ случайной погрешности. Случайная погрешность проявляет себя в случайных отклонениях получаемых значений выходной величины $Y_x, Y_0, Y_1, \dots, Y_n$ от значений, соответствующих градуировочной характеристике средства измерений. Предположим, что эти отклонения $\Delta Y_x, \Delta Y_0, \Delta Y_1, \dots, \Delta Y_n$ аддитивны, независимы и имеют одинаковую дисперсию σ_Y^2 . Эти случайные отклонения через функцию (1) трансформируются в случайную погрешность вычисленного результата измерений.

Для анализа этой погрешности целесообразно все погрешности ΔY привести ко входу средства измерений с помощью формулы

$$\Delta X = \Delta Y / S,$$

где ΔX – погрешность, приведенная ко входу средства измерений;

ΔY – погрешность на выходе средства измерений;

S – чувствительность средства измерений в данной точке диапазона измерений.

При анализе случайной погрешности можно пренебречь погрешностью нелинейности функции преобразования, т. е. можно считать, что $S = \text{const}$. Тогда дис-

персия случайной погрешности, приведенной ко входу средства измерений, равна

$$\sigma_{ex}^2 = \sigma_Y^2 / S^2.$$

Случайную погрешность, приведенную ко входу, можно рассматривать как эквивалентное изменение входной величины в соответствующем измерении. Таким образом, случайные отклонения $\Delta Y_x, \Delta Y_0, \Delta Y_1, \dots, \Delta Y_n$ соответствуют эквивалентным отклонениям $\Delta X_{ex}, \Delta M_0, \Delta M_1, \dots, \Delta M_n$ входных величин $X, M_0, M_1, \dots, M_n$.

В соответствии с формулой (1) эти отклонения входных величин приводят к погрешности вычисленного значения измеряемой величины:

$$\Delta X = \Delta X_{ex} + \sum_{j=0}^n L_j(Y_x) \cdot \Delta M_j.$$

Отсюда следует, что дисперсия случайной погрешности вычисленного результата измерений равна

$$\sigma_X^2 = \sigma_{ex}^2 \cdot \{1 + \sum_{j=0}^n [L_j(Y_x)]^2\}.$$

Отношение

$$\lambda = \frac{\sigma_X}{\sigma_{ex}} = \sqrt{1 + \sum_{j=0}^n [L_j(Y_x)]^2} \quad (10)$$

характеризует степень усиления случайной погрешности в результате применения алгоритма повышения точности. Очевидно, что $\lambda \geq 1$.

Для модели 2-го порядка ($n = 2$) формула (10) принимает вид

$$\lambda = \sqrt{1 + \left[\frac{(Y_x - Y_1) \cdot (Y_x - Y_2)}{(Y_0 - Y_1) \cdot (Y_0 - Y_1)} \right]^2 + \left[\frac{(Y_x - Y_0) \cdot (Y_x - Y_2)}{(Y_1 - Y_0) \cdot (Y_1 - Y_2)} \right]^2 + \left[\frac{(Y_x - Y_0) \cdot (Y_x - Y_1)}{(Y_2 - Y_0) \cdot (Y_2 - Y_1)} \right]^2}. \quad (11)$$

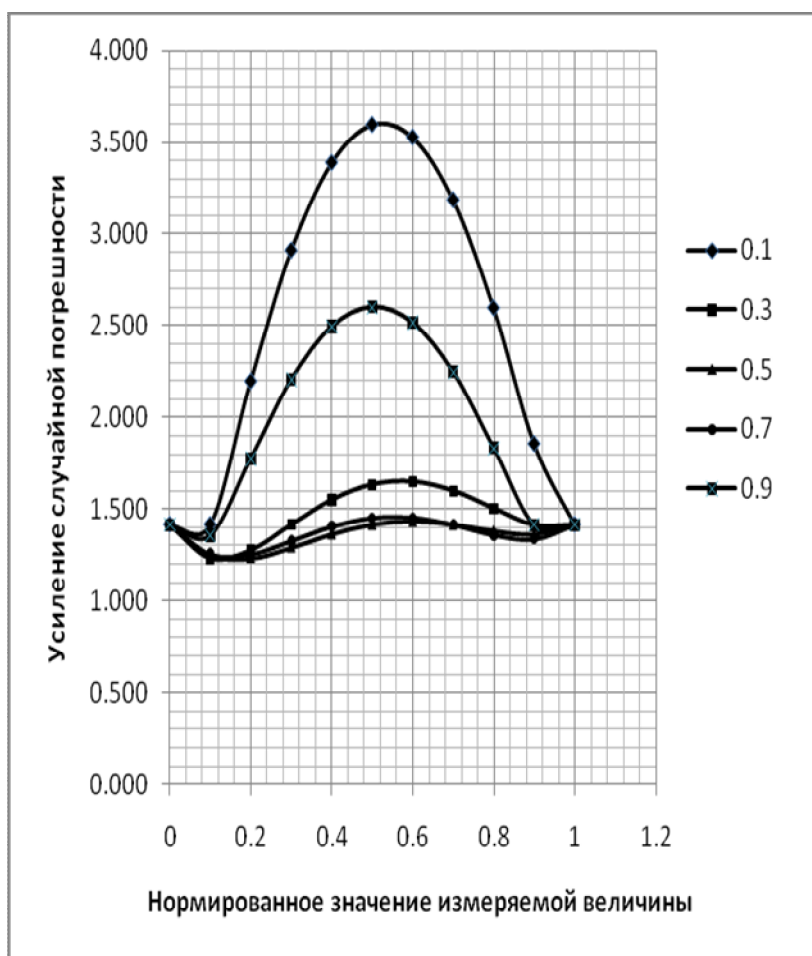
При анализе случайной погрешности для упрощения формулы (11) можно пренебречь нелинейностью функции преобразования средства измерений. Тогда, считая, что $M_0 = 0$; $M_1 = \alpha \cdot X_{\max}$; $M_2 = X_{\max}$, и введя безразмерную нормированную переменную $X_n = X / X_{\max}$, получим

$$\lambda = \sqrt{1 + (1 - X_n)^2 \cdot (1 - X_n)^2 + \frac{X_n^2 \cdot (1 - X_n)^2}{\alpha^2 \cdot (1 - \alpha)^2} + \frac{X_n^2 \cdot (X_n - \alpha)^2}{(1 - \alpha)^2}}. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что в узлах интерполяции ($X_n = 0; X_n = \alpha; X_n = 1$) случайная погрешность усиливается в $\sqrt{2}$ раз. На рисунке приведены зависимости степени усиления λ случайной погрешности от нормированного значения измеряемой величины X_n при различных положениях значения меры M_1 в диапазоне измерений (при различных значениях α).

Из графиков видно, что если значение α выбирается в пределах $\alpha = 0,5 \dots 0,7$, то степень усиления случайной погрешности не превышает $\sqrt{2}$ во всем диапазоне из-

менения измеряемой величины. Оценка величины σ_{ex} должна быть получена экспериментально.



Степень усиления случайной погрешности

Таким образом, выполненный метрологический анализ методов образцовых сигналов на основе обратных интерполяционных моделей позволяет оптимизировать значения образцовых воздействий, а также оценить основные составляющие результирующей погрешности измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Купер В.Я., Рубцов М.Г. Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки, №7(28). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 67-73.
2. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

Статья поступила в редакцию 30 января 2012 г.

THE METROLOGICAL ANALYSIS OF METHODS OF EXEMPLARY SIGNALS ON THE BASIS OF RETURN INTERPOLATIONAL MODELS

V.Ya. Kuper¹, M.G. Rubtsov²

Samara State Technical Universitet
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

"Scientific@Production Center PALS"
196, Tashkentskaya st., Samara, 443095

In paper methods of raise of accuracy of measurements on the basis of return mathematical models of a measuring channel are observed, in the capacity of which interpolational polynomials of Lagranzh are used. The basic making error+s of result of measurements are analyzed at use of methods of exemplary signals and return interpolational models, the problem of optimum sampling of values of exemplary magnitudes is solved.

Keywords: *raise of accuracy of measurements, error of measurements, a measuring channel, an interpolational polynomial, methods of exemplary signals.*

*Vitali Ya. Kuper (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Michael G. Rubtsov (Ph.D. (Techn.)), director.*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЛИНИЙ СВЯЗИ И СХЕМ ВТОРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДАВЛЕНИЯ

В.С. Ляпидов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается методика оценки влияния неустойчивости линий связи и схем вторичного преобразования на точностные характеристики измерительных систем давления высокотемпературных жидких и газовых сред с емкостными первичными преобразованиями.

Ключевые слова: измерительная система давления, емкостный первичный преобразователь, линия связи.

Агрессивность и высокая температура контролируемых в энергетике жидких и газовых сред порождает ряд сложных научно-технических проблем, одна из которых – создание надежных высокочувствительных средств теплотехнического контроля объектов, требующих повышенной термической напряженности [1].

Современные тенденции развития первичных преобразователей (ПП), способных работать в жестких условиях, предполагают использование сенсорных систем на основе технологии микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС) [2, 3]. Указанные сенсорные системы на кремниевой и карбид-кремниевой основе возникли как технологии, объединяющие механические конструкции ПП микро- и наноуровня с микроэлектроникой средств вторичного преобразования (ВП) в одном устройстве. Однако такое объединение ПП со средствами ВП в одном устройстве в условиях агрессивной среды и высоких ($200 - 500^{\circ}\text{C}$) температур не позволяет на сегодняшний день избежать множества трудностей и проблем, которые необходимо преодолеть, прежде чем эти системы станут пригодными для массового применения [2]. В этой связи большой интерес по-прежнему представляет использование предельно простых конструкций ПП (например емкостных), способных работать в условиях агрессивной среды и высоких температур. При этом автогенераторная схема ВП измерительной системы давления (ИСД), например жидкого теплоносителя, представляет собой выносной блок, удаленный от ПП на $10 \div 20$ метров. В связи с непрерывным ростом применения частотных измерительных систем возросло значение емкостных ПП с резонаторным чувствительным элементом (например емкостных струнных первичных преобразователей) [4]. При этом из всех возможных способов возбуждения и приема колебаний струны наиболее соответствует специфическим условиям измерения давления теплоносителя емкостный электростатический способ с фазовым методом измерения изменений емкости электростатического струнного преобразователя (ЭСП) [5].

В указанных ИСД актуальным является анализ влияния неустойчивости линий связи, соединяющих ЭСП с автогенераторными средствами ВП, а также влияния неустойчивости схем ВП на точностные характеристики ИСД. Анализ сводится к анализу взаимодействия струны ЭСП с электростатическим полем ее «раскачки». При

анализе сделаны следующие допущения:

- масса струны ЭСП рассматривается как сосредоточенная в центре струны масса m ;
- механическая модель струны представлена на рис. 1 в виде шара (1) малого диаметра, связанного с расположенными горизонтально пружинами (2) и (3);
- масса шара (1) сосредоточена в его центре;
- колебания шара вдоль оси абсцисс – незатухающие.

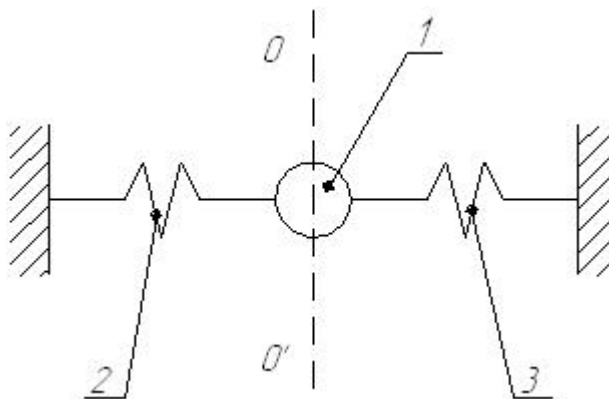


Рис. 1. Механическая модель струны ЭСП

Кинетическая энергия струны с массой m за половину периода колебаний может быть определена как

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \overline{V} \overline{F} dt = \frac{mV^2}{2},$$

где $\overline{V}$ – вектор скорости ЭСП; $\overline{F}$ – вектор силы, действующий на струну. Влияние составляющих $F_{\text{эл}1}$, $F_{\text{эл}2}$ силы $F_{\text{эл}}$ электростатического поля «раскачки» струны ЭСП на частоту сигнала ω на выходе схем ВП удобно представить как изменения эквивалентной массы струны. Выражение для этого определения эквивалентной массы струны m_1 имеет вид

$$m_1 = \frac{2}{V_m^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_m \cos \omega t (F_m \sin \omega t + F_{\text{эл}1} \sin \omega t) dt = \frac{F_m}{V_m \omega} + \frac{F_{\text{эл}1}}{V_m \omega} = m_2 + m_3,$$

где V_m – амплитудное значение скорости струны; F_m – сила, возвращающая струну при ее отклонении от среднего положения $00'$ (см. рис. 1).

Векторные диаграммы сил, действующих на струну, приведены на рис. 2, а и рис. 2, б.

Относительное изменение массы струны ЭСП, вызванное взаимодействием струны с электростатическими силами «раскачки», имеет вид

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} = \frac{F_{\text{эл}1}}{F_m} = \frac{F_{\text{эл}} \sin \varphi}{F_{\text{эл}2} Q} = \frac{F_{\text{эл}} \sin \varphi}{F_{\text{эл}} \cos \varphi Q} = \frac{\tan \varphi}{Q}, \quad (1)$$

где Q – добротность струны; φ – фазовый сдвиг между $F_{\text{эл}1}$ и $F_{\text{эл}2}$.

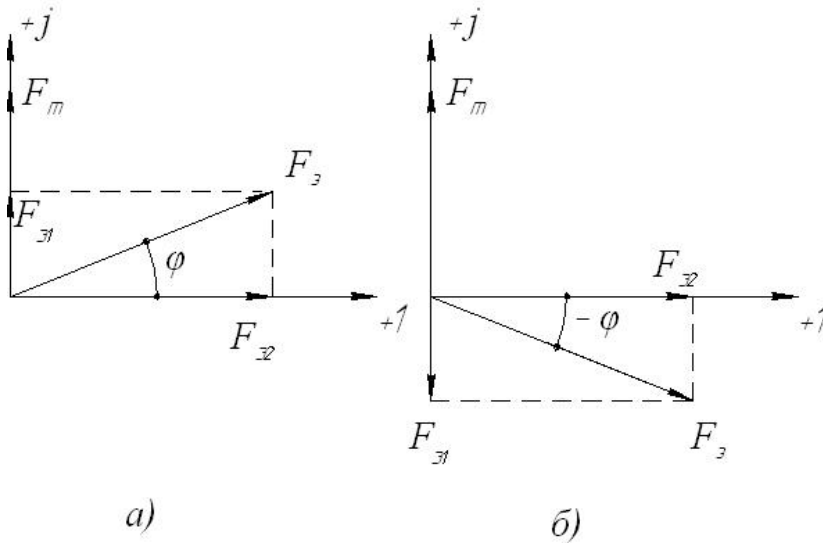


Рис. 2. Диаграмма сил, действующих на струну ЭСП

Тогда относительное изменение частоты на выходе схем ВП и относительная погрешность измерения давления δ жидкого теплоносителя, вызванные взаимодействием струны ЭСП с силами электростатической «раскачки», могут быть определены из соотношений:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \left(\frac{1}{1 + \operatorname{tg}\varphi/Q} - 1 \right)^{0.5};$$

$$\delta = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{Q},$$

где P – измеряемое давление, ΔP – абсолютное изменение давления.

Как следует из (1), относительное изменение массы струны может быть положительным или отрицательным при $\varphi > 0$ или $\varphi < 0$, значит, и частота сигнала на выходе схем ВП может быть меньше или больше частоты собственных поперечных колебаний струны ЭСП. При $\varphi \neq 0$ появляется составляющая F_{31} силы F_3 , совпадающая по направлению с силой F_m (или направленная в противоположенную сторону), т. е. увеличивающая или уменьшающая силу реакции струны F_m при ее отклонении от среднего положения $00'$ (см. рис. 1).

К числу причин, вызывающих появление угла сдвига фаз φ , можно отнести:

- неточность настройки схем фазового корректора [5];
- изменение геометрических размеров струны ЭСП (из-за изменения, например, температуры среды, окружающей ЭСП);
- изменение постоянных времени цепей, входящих в состав канала электростатического возбуждения колебаний струны ЭСП (из-за старения компонентов схемы канала или из-за изменения температуры среды, окружающей ВП).

Для исследования допустимых пределов изменения параметров линий связи, соединяющих ЭСП со средствами ВП ИСД, может быть использована схема, приведенная на рис. 3, где обозначены: ЭСП – емкостный электростатический струнный

преобразователь ($C_{II} = 2.1 \text{ пФ}$, $\Delta C_{II} = 0.03 \dots 0.3 \text{ пФ}$ при возбуждении струны на резонансной частоте); ВП – автогенераторная схема вторичного преобразователя; K – кабель радиочастотный (емкость кабеля 2000 пФ); R – резистор переменный; C – конденсатор переменной емкости; В – вольтметр универсальный, класс 2.5; Ч – частотомер.

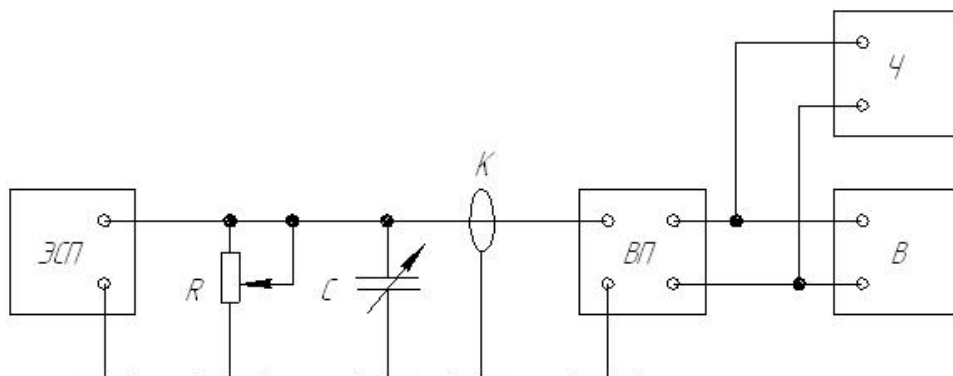


Рис. 3. Схема установки для исследования допустимых пределов изменения параметров линии связи

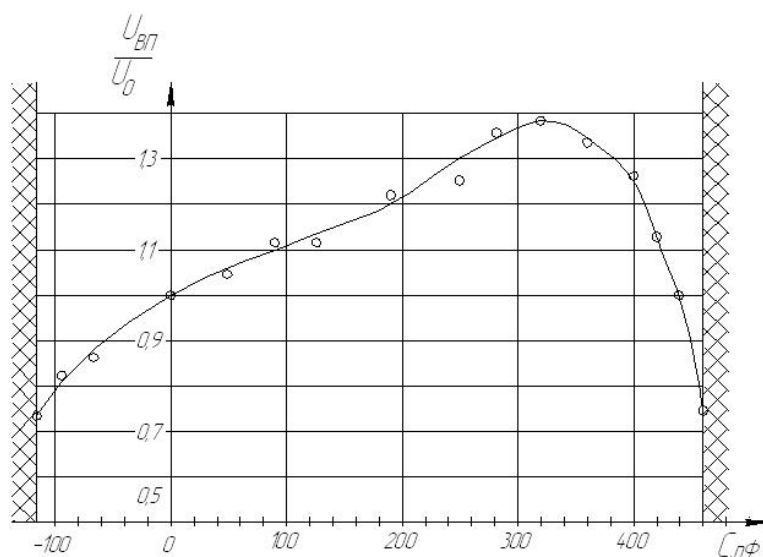


Рис. 4. Кривая зависимости относительного напряжения на выходе ВП ИСД от изменения емкости кабеля

Автогенераторная схема ВП ИСД с фазовым методом измерения емкости ЭСП [5] показала устойчивую работу при изменении R в пределах от ∞ до 30 кОм и при изменении емкости конденсатора C в пределах от -110 пФ до $+450 \text{ пФ}$ (изменением емкости конденсатора C в пределах от 0 до -110 пФ имитировалось снижение емкости кабеля). На рис. 4 и рис. 5 представлены зависимости:

$$\frac{U_{ВП}}{U_0} = f_1(C); \frac{U_{ВП}}{U_0} = f_2(R),$$

где $U_{ВП}$ – напряжение на выходе ВП ИСД при $0 \leq R < \infty$; $C \neq 0$; U_0 – напряжение на выходе ВП ИСД при $R = \infty$; $C = 0$.

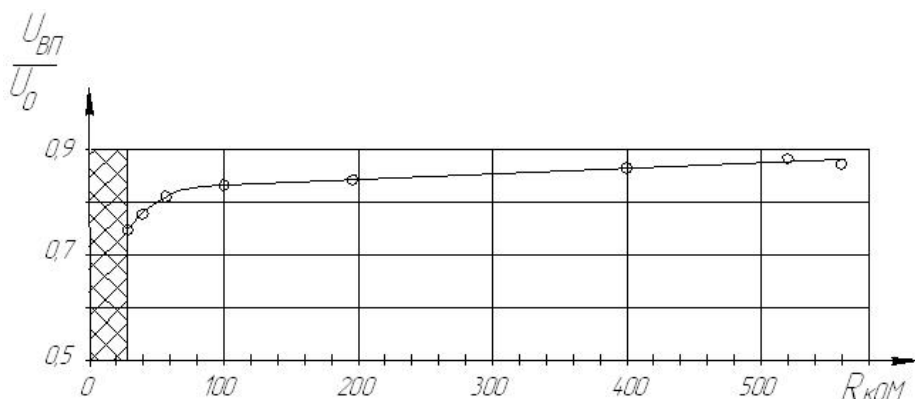


Рис. 5. Кривая зависимости напряжения на выходе ВП ИСД от изменения сопротивления изоляции кабеля

При изменении емкости конденсатора C в указанных пределах изменение частоты на выходе схем ВП не превышало 0.03% от среднего значения частоты на выходе ВП ИСД. Исследования проводились в диапазоне рабочих частот ЭСП от 400 до 1500 Гц.

В результате проведенного анализа влияния нестабильности параметров линий связи и схем вторичного преобразователя на работу измерительного канала ИСД установлено:

- отклонение частоты на выходе схем ВП ИСД от частоты собственных колебаний струны ЭСП возможно за счет сдвига фаз φ между силой электростатической «раскачки» струны F_s и ее составляющей F_{s2} , опережающей силу реакции струны ЭСП F_m или отстающей от нее;

- относительная погрешность измерения давления жидкого теплоносителя (вызванная взаимодействием струны ЭСП с силами электростатической «раскачки» струны) может быть снижена путем уменьшения величины сдвига фаз φ или повышения добротности струны ЭСП;

- проведенные исследования допустимых пределов изменения активного и реактивного сопротивлений линии связи (кабеля), соединяющей ЭСП со схемами ВП ИСД, показали, что работоспособность схем ВП не ухудшается при изменении емкости и сопротивления изоляции кабеля в широких пределах (R от ∞ до 30кОм ; C в пределах от -110пФ до $+450\text{пФ}$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляпидов В.С. К вопросу построения измерительных систем давления жидкого теплоносителя в энергетических объектах // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010): Материалы Международной науч.-техн. конференции. 17-21 мая 2010 г. СамГТУ. – Самара, 2010. – С. 182-185.
2. Ниева П. Новые тенденции в технологии МЭМС-датчиков для применения в жестких внешних условиях // Датчики и системы. – 2008. – №5. – С. 38-46.
3. Мокров Е.А., Баринов И.Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков дав-

- ления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – №1. – С. 23-27.
4. Брехов Р.С. и др. Струнный измеритель давления // Магнитная гидродинамика. – 1974. – №4. – С. 150-151.
 5. Ляпидов В.С. Повышение чувствительности измерительной части ИИС с резонансными первичными преобразователями // Вестник СамГТУ, вып. 1(19). Сер. Технические науки. – 2007. – С. 191-193.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2012 г.

A METHOD TO ESTIMATE THE IMPACT OF INSTABILITY OF COMMUNICATION LINES AND SECONDARY TRANSFORMATION CIRCUITS ON THE PRECISION OF PRESSURE MEASUREMENT SYSTEMS

V.S. Lyapidov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A method to estimate the impact of instability of communication lines and secondary transformation circuits on the precision characteristics of pressure measuring systems for high-temperature liquids and gases with primary capacitance transformation is discussed.

Keywords: *pressure measuring system, the capacitive sensing device, a line of communication.*

ГОЛОНОМНАЯ КОРРЕКЦИЯ В ЗАДАЧЕ СШИВКИ ПОЛОС ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МНОГОМАТРИЧНЫМ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Б.В. Мартемьянов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: bvmart@rambler.ru

Рассматривается задача сшивки полос изображений, полученных от ПЗС-матриц мультиматричного оптико-электронного преобразователя. Предлагается методика коррекции вычисленных параметров сшивки смежных полос, в существенной мере учитывающая геометрические (голономные) особенности взаимного расположения ПЗС-матриц в составе мультиматричного оптико-электронного преобразователя. При этом вычисление параметров сшивки осуществляется непосредственно по изображениям без привлечения данных об ориентации носителя оптической системы относительно изображенной поверхности.

Ключевые слова: оптико-электронный преобразователь, сшивка изображений, голономные связи, метод функционализации.

К видеоаппаратуре систем пассивного обзора, наведения и целеуказания предъявляются, зачастую одновременно, высокие требования к размерам поля обзора, разрешающей способности, отношению сигнал/шум и параметрам дискретизации видеосигнала по времени и уровню. В современных технологических ограничениях таким требованиям могут удовлетворять только мультиматричные оптико-электронные преобразователи (МОЭП) изображения, составленные из отдельных матричных приборов с зарядовой связью (ПЗС). Примером может служить аппаратура типа «Сангур» производства российской фирмы «Оптекс», предназначенная для работы с изобразительными системами космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). МОЭП такого типа состоят из многострочных ПЗС матриц, видеосигнал с которых снимается только с одной строки матрицы. Остальные строки матрицы работают в режиме временной задержки и накопления заряда (в режиме ВЗН), накапливая видеосигнал в виде заряда в ПЗС-ячейках матрицы. Двумерное (кадровое) изображение формируется такими системами «заметанием» (сканированием) поля обзора в направлении нормали к линии, проходящей через центры ПЗС-ячеек, составляющих одну строку ПЗС матрицы. В системах ДЗЗ такое сканирование осуществляется за счет движения КА по орбите, но возможно инициирование сканирования за счет эволюций КА относительно собственного центра масс. Формирование кадра способом заметания, при котором естественным образом реализуется режим ВЗН, вызвано необходимостью получения изображения с приемлемым отношением сигнал/шум в условиях малости светосилы оптического сигнала, достигающего отдельные ПЗС-ячейки матрицы.

ПЗС-матрицы в МОЭП располагаются на плоскости изображения (на картинной плоскости) оптической системы (ОС) на конструктивно минимально возможном расстоянии друг от друга, составляя сборку, напоминающую «коленвал» (рис. 1).



Рис. 1. Взаимное расположение ПЗС-матриц в фокальной плоскости ОС

При сканировании поля обзора таким МОЭП каждая ПЗС-матрица порождает полосу изображения. Смежные края фоточувствительных зон ПЗС-матриц, входящих в «коленвал» МОЭП, перекрываются (см. рис. 1). В результате на смежных краях полос изображений, полученных от соседних матриц при штатной работе системы сканирования, присутствуют области (назовем их «швами»), которые отображают одни и те же объекты. При сборке из отдельных полос единого изображения необходимо совместить изображения одних и тех же объектов в пересекающихся областях смежных полос и удалить дубликаты таких изображений. Эта задача называется сшивкой изображений [1]. Задача сшивки изображений осложнена тем, что изображения имеют цифровую форму представления видеосигнала: дискретизированы по пространственным координатам (пикселям, порождаемым дискретными ПЗС-ячейками в структуре ПЗС матриц), амплитуде (результат ограниченной длины разрядной сетки для представления цифрового кода яркости пиксела) и времени (результат экспозиции изображения на ПЗС матрицы в течение некоторого интервала времени).

На рис. 1 величины Δx_i и Δx_{i+1} задают локальную ширину областей перекрытия смежных концов соседних матриц, порождающих швы на изображениях. Ширину таких областей далее будем считать измеренной в «пиксельной» метрике, считая, что в этой метрике размер одной ПЗС-ячейки (пиксела) в любом направлении равен 1. При этом расстояние между соседними пикселями в строках и в столбцах ПЗС матрицы также равно 1.

К сожалению, локальная ширина (Δx_i и Δx_{i+1} на рис. 1) каждого шва не постоянна даже на одном изображении. Поэтому в задаче сшивки полос необходимо для каждой строки y изображения $n+1$ полосы вычислить двумерный вектор ее сдвига относительно полосы с номером n . Далее этот вектор называется «параметр сшивки».

Задача сшивки изображений решается в 2 этапа:

- с субпиксельной точностью вычисляются локальные параметры сшивки в строках вдоль шва (совокупность этих параметров называется далее «протоколом сшивки»);

- содержимое протокола сшивки по всем швам используется для синтеза по исходным изображениям полос единого сшитого изображения.

В статье рассматриваются только вопросы, связанные с первым этапом сшивки.

Объективные локальные особенности изображений, попадающих в область шва, могут затруднить или сделать невозможным достаточно точное сведение изображений в этих локальных подобластях. К таким особенностям относятся:

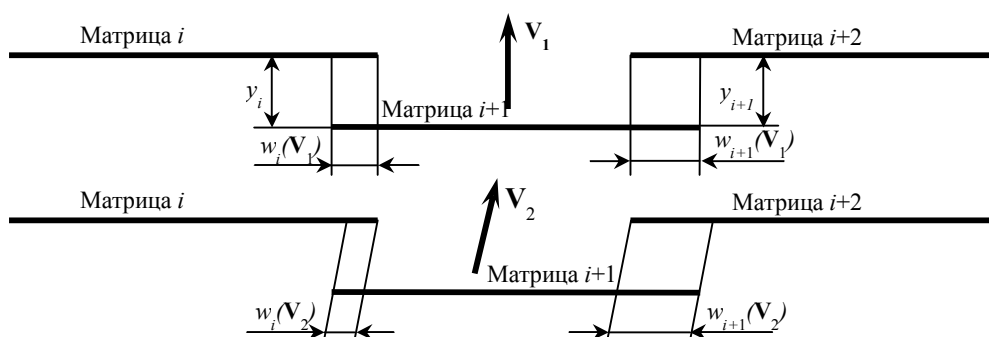
- малая вариация контраста изображения на фоне шума, например на водных гладях, облаках, полях, крышах зданий, в области теней, например от высоких зданий;

– наличие изображений протяженных линейных структур (линеаментов) различной природы, в ближайшей окрестности которых мала вариация контраста изображения (апертурная проблема);

– брак в изображениях, вызванный, например, засветкой ПЗС-ячеек от ярких снимаемых объектов (освещенных солнцем облаков, блестящих металлических крыш).

В таких случаях возникает необходимость в доопределении протокола сшивки там, где фрагменты полос изображений не удалось свести. Доопределение протокола в неблагоприятных локальных подобластях может быть сделано применением методов интерполяции либо на основе использования дополнительной информации. Оказалось, что в качестве дополнительной информации весьма продуктивно использовать геометрические (голономные) связи между крайними ПЗС-ячейками смежных сторон соседних ПЗС матриц (рис. 2). Учет таких голономных связей позволил, например, решить задачу отождествления мультиматричной видеокамеры с полученными ею снимками [2].

Рис. 2. Смежные швы при разных углах рыскания



На рис. 2 показаны два возможных варианта (V_1 , V_2) ориентации вектора скорости «бега» изображения на картинной плоскости ОС. Ориентация векторов V_1 и V_2 относительно матриц МОЭП есть угол сноса (Ψ) изображения относительно этих матриц. Он вызван наличием угла рыскания и изменением угла крена носителя ОС в процессе проведения съемки местности способом заметания. На рис. 2 значению угла $\Psi = 0$ соответствует вектор V_1 , который ориентирован по нормали к матрицам МОЭП, а ненулевому значению этого угла – вектор V_2 .

В процессе формирования изображения значение угла сноса Ψ может варьировать. В результате ширина шва по границе склеивания полос изображений, полученных от двух смежных матриц, будет изменяться от строки к строке. Поэтому ширина w_i i -го шва зависит от номера y строки изображения и от ширины областей перекрытия смежных концов соседних матриц Δx_i , то есть

$$w_i = w_i(\Delta x_i, \Psi(y)). \quad (1)$$

Поскольку угол Ψ однозначно определяется вектором V , то последнюю зависимость можно представить в виде

$$w_i = w_i(\Delta x_i, V(y)). \quad (2)$$

Из элементарных геометрических соотношений (см. рис. 2) ясно, что при условии идеального расположения матриц (строго на параллельных линиях картинной

плоскости) уменьшение/увеличение w_i сопровождается равным увеличением/уменьшением w_{i+1} (3):

$$w_i(V_1) - w_i(V_2) = w_{i+1}(V_2) - w_{i+1}(V_1). \quad (3)$$

Поэтому при вариации вектора V сохраняются значения сумм $w_i(V) + w_{i+1}(V)$ для каждой пары соседних швов. Тогда в рассматриваемых идеальных условиях и для обозначений на рис. 1 и рис. 2 справедливо следующее:

$$\Delta x_i + \Delta x_{i+1} = w_i(V_1) + w_{i+1}(V_1) = w_i(V_2) + w_{i+1}(V_2) = \Delta_{i,i+1}. \quad (4)$$

Отсюда следует важный вывод: суммарная ширина двух соседних швов для одной и той же строки y полосы изображения от i матрицы является константой, индивидуальной для каждой сборки матриц, и равной сумме $\Delta x_i + \Delta x_{i-1}$ (см. рис. 1) взаимных перекрытий i -й матрицы с соседними матрицами.

Ширина Δx_i зон перекрытия смежных сторон соседних матриц различна для разных пар матриц, прежде всего по причине неидеальной точности взаимного позиционирования матриц в процессе их механической сборки в МОЭП. По этой же причине возникают ошибки позиционирования (перекоса) матриц относительно параллельных линий на картинной плоскости, вдоль которых эти матрицы расположены (рис. 2). Последние ошибки приводят к нарушению равенств (3) и (4).

На рис. 2 через y_i обозначено расстояние между крайними строками ПЗС ячеек соседних матриц. В идеальном случае, для которого справедливы равенства (3) и (4), матрицы с номерами i и $i+2$ расположены на одной прямой, и при этом $y_i = y_{i+1}$. Выполненная оценка возможных невязок равенств (3) и (4) по причине перекося положения матрицы на примере реальных параметров аппаратуры типа «Сангур» фирмы «Оптекс» показала следующее.

В режиме съемки с углом сноса Ψm изображения, при котором получается смаз изображения вдоль его строк в 2 пиксела, перекося положения матрицы, нарушающий равенство $y_i = y_{i+1}$ на 1 пиксел, порождает невязку в равенствах (3) менее 0,01 пиксела. Эта оценка более чем на порядок меньше достаточной точности (0,1...0,3 пиксела) вычисления параметров сшивки изображений. Кроме того, на практике величина Δy_i составляет доли пиксела, а угол Ψm сноса изображения, использованный в оценке, превышает реальные углы сноса. Это позволяет в дальнейшем изложении пренебречь возможной невязкой равенств в (3) и в (4), вызванной перекосям положения матриц относительно их идеального положения. Результат решения задачи отождествления мультиматричной видеокамеры с полученными ею снимками [2] на основе учета голономных связей во взаимном позиционировании соседних матриц в МОЭП подтверждает допустимость такого пренебрежения возможными невязками.

Далее будем считать, что значения компонент Δx_i вектора $X = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_m)$, участвующих в равенствах (4), известны с некоторыми погрешностями, а значения w_i вычислены с некоторыми погрешностями.

Обозначим:

$\sim x_i, \sim w_i$ – оценка точного значения Δx_i и w_i из (4);

x_i – точное значение Δx_i ;

εx_i – абсолютная погрешность оценки $\sim x_i$;

$w_i, \varepsilon w_i$ – точное значение и абсолютная погрешность вычисленной оценки $\sim w_i$ значения w_i .

При этих обозначениях имеем:

$$\sim x_i = x_i + \varepsilon x_i, \quad \sim w_i = w_i + \varepsilon w_i. \quad (5)$$

С учетом введенных обозначений перепишем (4) в следующем виде:

$$\sim w_i + \sim w_{i+1} = \sim x_i + \sim x_{i+1}. \quad (6)$$

Из (6) можно сделать вывод: компоненты $\sim x_i$ вектора $\sim X = (\sim x_1, \dots, \sim x_m)$ конструктивных взаимных перекрытий матриц, являющиеся константами для данной сборки матриц, позволяют контролировать и корректировать с некоторой погрешностью как вычисляемые значения сумм $\sim w_i + \sim w_{i+1}$, так и вычисляемую ширину $\sim w_i$ отдельного шва. Рассмотрим соответствующую процедуру подробнее.

Несложно видеть, что ширина всех швов через один изменяется в одинаковом направлении. Если, например, ширина 3-го шва увеличивается, то увеличивается ширина всех швов с нечетными номерами и уменьшается ширина всех швов с четными номерами, поскольку ширина любых двух соседних швов изменяется в противоположном направлении. Поэтому (в условиях идеализированного расположения матриц), если изменение угла Ψ сноса изображения приводит к приращению Δw_i ширины w_i i -го шва, то и все швы с номерами $i \pm 2n$, $n=1, \dots, N$ получают такое же по значению приращение. На основании этого наблюдения и с учетом вышеизложенного можно записать следующие равенства, предполагающие наличие в составе МОЭП 6 матриц, порождающих 5 швов:

$$\begin{aligned} \sim w_1 + \sim w_2 &= \sim x_1 + \sim x_2; \\ \sim w_1 + \sim w_4 &= \sim x_1 + \sim x_4; \\ \sim w_2 + \sim w_3 &= \sim x_2 + \sim x_3; \\ \sim w_2 + \sim w_5 &= \sim x_2 + \sim x_5; \\ \sim w_3 + \sim w_4 &= \sim x_3 + \sim x_4; \\ \sim w_4 + \sim w_5 &= \sim x_4 + \sim x_5. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что система равенств (7) избыточна, поскольку некоторые из них являются линейной комбинацией других. Применительно к рассматриваемым вопросам эти избыточные (линейно зависимые) равенства оказываются полезными для голономной коррекции протоколов сшивки полос изображений.

Из соотношений (7) следует: если известны значения всех компонент вектора $\sim X = (\sim x_1, \dots, \sim x_5)$, то для вычисления значений компонент вектора $\sim W = (\sim w_1, \dots, \sim w_5)$ достаточно вычислить какое-либо одно из них, а по нему все остальные могут быть выведены из (7). Такую методику расчета ширины швов будем называть «косвенной», в отличие от методики «прямого» определения ширины швов методом совмещения изображений. Например, определив непосредственно по изображениям значение $\sim w_1$, получим последовательно:

$$\sim w_2 = \sim x_1 + \sim x_2 - \sim w_1; \sim w_4 = \sim x_1 + \sim x_4 - \sim w_1; \sim w_3 = \sim x_2 + \sim x_3 - \sim w_2; \sim w_5 = \sim x_2 + \sim x_5 - \sim w_2. \quad (8)$$

Все возможные варианты вывода четырех значений компонент вектора $\sim W = (\sim w_1, \dots, \sim w_5)$ по одному из них удобно представить в виде неориентированного графа (рис. 3).

На графе ребро, соединяющее вершины v_j и v_i , означает, что значения $\sim w_j$ и $\sim w_i$ входят в одно и то же равенство (7) и непосредственно по этому равенству по значе-

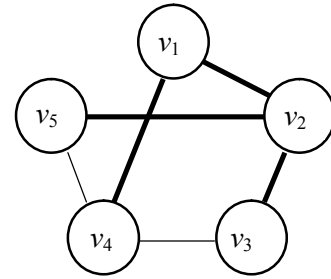


Рис. 3. Граф голономных связей

нию $\sim w_j$ можно вычислить значение $\sim w_i$ и наоборот.

Ребра графа, нарисованные жирными линиями, задают дерево-остов, иллюстрирующее процедуру (8) вычисления значений $\sim w_2, \dots, \sim w_5$ по известному значению $\sim w_1$.

Очевидно, что в этом графе из любой его вершины достижимы все остальные. Поэтому любая из 5 компонент вектора W позволяет вычислить все остальные.

Прием косвенного вычисления ширины w_i швов позволяет вычислять значения w_i для фрагментов швов, по которым прямое вычисление невозможно из-за неблагоприятных локальных особенностей изображения, основные возможные варианты которых перечислены выше.

Оценим погрешность вычисления компонент вектора W по системе равенств (7), то есть с помощью графа рис. 3.

Каждая строка системы равенств (7) имеет вид (6).

Из (6) с учетом (5) получаем:

$$\sim w_i = w_i + \varepsilon w_i = \sim x_i + \sim x_j - \sim w_j = x_i + x_j - w_j + \varepsilon x_i + \varepsilon x_j - \varepsilon w_j. \quad (9)$$

Из (9) получим погрешность εw_i вычисленной оценки $\sim w_i$ для w_i :

$$\varepsilon w_i = \varepsilon x_i + \varepsilon x_j - \varepsilon w_j. \quad (10)$$

Погрешности εx_i и εx_j в (10) носят статический характер: не зависят от обрабатываемых изображений и от положения обрабатываемых фрагментов изображений на швах. Поэтому динамические свойства ошибки εw_i вычисляемого значения $\sim w_i$ вдоль i -го совпадают по модулю и противоположны по знаку динамическим свойствам ошибки εw_j оценки $\sim w_j$ для соседнего j -го шва, по которому вычисляется i -й шов.

Выведем выражения для погрешности вычисления ширины швов при различных путях передвижения по графу голономных связей.

Не теряя общности и для простоты рассмотрим процесс вычисления $\sim w_3$ по вычисленному значению $\sim w_1$ для двух путей между этими вершинами: для пути $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$ и для пути $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$. Ошибки вычисленных оценок $\sim w_3$ для w_3 на этих путях обозначим как εw_3^{123} и εw_3^{14523} .

Для первого из рассматриваемых путей, выразив $\sim w_3^{123}$ через $\sim w_2$, а $\sim w_2$ через $\sim w_1$, получим:

$$w_3 + \varepsilon w_3^{123} = \sim x_3 - \sim x_1 + \sim w_1 = x_3 - x_1 + w_1 + \varepsilon x_3 - \varepsilon x_1 + \varepsilon w_1. \quad (11)$$

Из (11) следует:

$$\varepsilon w_3^{123} = \varepsilon x_3 - \varepsilon x_1 + \varepsilon w_1. \quad (12)$$

Для пути $v_1 \rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$ аналогичными подстановками получим:

$$\varepsilon w_3^{14523} = \varepsilon x_3 - \varepsilon x_1 + \varepsilon w_1. \quad (13)$$

Видим, что $\varepsilon w_3^{14523} = \varepsilon w_3^{123}$. Причем в выражения для εw_3^{14523} и εw_3^{123} не входят параметры швов, которые соответствуют промежуточным вершинам путей на графе голономных связей. Следовательно, погрешности εw_j вычисления оценки $\sim w_j$ ширины w_j швов по голономным связям:

- не зависят от пути продвижения по графу голономных связей;
- не накапливаются при движении по графу голономных связей;
- зависят от погрешности εw_i вычисленной оценки $\sim w_i$ ширины шва, из которого выводится ширина всех остальных швов;

– зависят от погрешностей εx_3 и εx_1 информации о взаимных перекрытиях матриц только двух швов.

Погрешности εw_i связаны с обработкой некоторого отдельного шва и изменяются вдоль шва. Значения же $\sim x_i$ вычисляются и уточняются по результатам обработки десятков изображений и имеют постоянное значение. Поэтому погрешности εx_i должны быть многократно (на порядки) ниже средних погрешностей εw_i : $\varepsilon w_i \gg \varepsilon x_i$. С учетом этого погрешностями εx_i при их суммировании со значениями εw_i в выражениях (10), (12) и (13) можно пренебречь. Тогда из этих выражений можно сделать следующие выводы:

– для пары (i, j) швов с нечетной длиной пути между ними на графе голономных связей имеем $\varepsilon w_i = -\varepsilon w_j$;

– для пары (i, j) швов с четной длиной пути между ними на графе голономных связей имеем $\varepsilon w_i = \varepsilon w_j$.

Последнее означает, что практически погрешности косвенного вычисления ширины швов на основе учета использованных голономных связей равны погрешности вычисленной по изображению ширины шва, от которого вычисляются остальные швы.

Итак, было показано, что по единственному вычисленному шву можно с достаточной точностью вычислить остальные швы. Однако для большей достоверности вычисления всех искомых значений $w_1, \dots, w_5$ следует пытаться вычислить каждое из них непосредственно, то есть по изображению. При этом голономные связи, определенные выше, можно использовать для корректировки значений, вычисленных с наименьшей степенью достоверности, или значений, которые не удалось вычислить непосредственно. В связи с этим возникают задача оценки достоверности вычисленного параметра сшивки и задача организации оптимального использования вычисленных результатов $\sim w_1, \dots, \sim w_5$ для увеличения точности вычисления хотя бы некоторых из искомых значений $w_1, \dots, w_5$.

Один из способов оценки достоверности вычисляемых параметров сшивки изложен в [3]. Этот способ оценки достоверности вытекает из метода функционализации параметров изображений, называемого далее «метод функционализации» [1, 3], на основе которого разработаны алгоритмы и программное обеспечение для вычисления параметров сшивки полос изображений.

Выше рассматривались вопросы использования голономных связей только для вычисления x координат векторов сшивки полос изображений. К сожалению, для y координат векторов сшивки (уКВШ) установить надежные голономные связи не удастся. Причина в том, что уКВШ чувствительна к высоте рельефа изображенной местности, которая от шва к шву может меняться достаточно значительно. Это затрудняет использование голономных связей, относящихся к уКВШ. Для обработки изображений плоской местности можно применить голономные связи и в отношении уКВШ.

Если изображенная местность достаточно плоская и в областях швов нет изображений высотных объектов (например башен, небоскребов, облаков), то уКВШ может изменяться только за счет эволюций носителя ОС относительно собственного центра масс. При этом доминирующее влияние на изменение уКВШ оказывает изменение угла тангажа носителя ОС. Поскольку все матрицы в МОЭП поворачиваются одинаково, изменения угла тангажа при съемке одинаково сказываются на изменениях уКВШ по всем швам.

На рис. 4 представлены два набора диаграмм протоколов сшивки двух соседних швов. Ось ординат задает проекции векторов сшивки на оси X и Y в пикселах. Ось

абсцисс задает номера строк изображения. Диаграммы $Y1$ и $Y2$ отображают y КВШ, а диаграммы $X1$ и $X2$ – x координаты векторов сшивки. На диаграммах x координаты имеют отрицательные значения потому, что задают сдвиг правой полосы влево.

На рис. 4, а «пики», достигающие нулевых значений на диаграммах $X1$ и $X2$, означают, что программа оценила вычисленные параметры векторов сшивки как недостаточно достоверные и вычисленные значения x координаты векторов были заменены значением 0. В результате коррекции протокола сшивки двух соседних полос (рис. 4, б) на основе рассмотренных в этой статье голономных связей все такие «пики» были заменены достоверными значениями параметров сшивки полос.

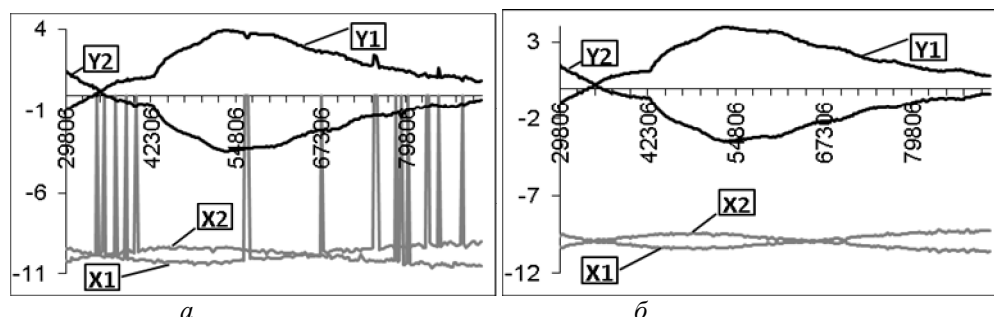


Рис. 4. Примеры диаграмм протокола сшивки: а) до коррекции; б) после коррекции

Диаграммы $Y2$ для исключения их сливания с диаграммами $Y1$ отображены с изменением знака всех вычисленных значений y составляющих векторов сшивки. При этом видна одинаковая динамика изменения y составляющих векторов сшивки в соседних швах: диаграммы симметричны относительно некоторой горизонтальной прямой, проходящей через точку пересечения этих диаграмм. Причем эта точка пересечения не совпадает с осью абсцисс, что говорит о перекосе положения матрицы: $y_i \neq y_{i+1}$.

Из сравнения двух наборов диаграмм можно заметить, что после коррекции уменьшились высокочастотные колебания диаграмм $X1$ и $X2$ и исчезли ложные пики на диаграммах $Y1$ и $Y2$. Причем ложные пики на $Y1$ совпадают с искусственными пиками на $X1$, означающими, что соответствующий вектор сшивки полос был отмечен как недостаточно достоверный.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартеньянов Б.В. Оценка качества алгоритма сшивки изображений, основанного на методе функционализации // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – №3(25). – Самара, 2009. – С. 88-95.
2. Мартеньянов Б.В. Метод отождествления многоматричной видеокамеры с полученными ею снимками // Информационно-управляющие системы. №6 (55). – СПб., 2011. – С. 11-15.
3. Кузнецов П.К. Метод определения вектора скорости движения подстилающей поверхности // П.К. Кузнецов, Б.В. Мартеньянов, В.И. Семавин, Е.Ю. Чеботило // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – №2. – Самара, 2008. – С. 96-110.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2012 г.

HOLONOMIC CORRECTION IN PROBLEM CROSSLINKING BAND IMAGES RECEIVED MULTIMATRIX OPTICAL-ELECTRONIC CONVERTER

B.V. Martemyanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

This article discusses the problem of stitching strips of images obtained by scanning the scene using multimatrix optoelectronic converters. A method of correcting the calculated parameters of stitching of adjacent strips of images to a large extent takes into account the geometric (holonomic) features of the relative position of CCD in the multimatrix optical-electronic converters. The computation of parameters of matching is done directly from the images without using data on the orientation of the optical system with respect to the source of images.

Keywords: *optical-electronic converter, stitching of images, holonomic matching, the method of functionalization of the parameters of images.*

СИНТЕЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ¹

В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается классификация методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям с использованием ортогональных гармонических сигналов. Предлагается новый подход к синтезу таких методов. Рассматриваются четыре метода, синтезированные на основе данного подхода.

Ключевые слова: интегральные характеристики, гармонические сигналы, мгновенные значения, ортогональные составляющие сигналов, сравнение сигналов, характерные точки.

Введение. Одним из наиболее часто используемых на практике видов сигналов являются периодические сигналы. На основе измерения их характеристик осуществляется контроль разного рода электрических и электронных генераторов, оценивается качество электрической энергии, проводятся испытания колебательных механических систем.

В настоящее время распространение получили методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям. Существенное сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входного сигнала, и определении ИХГС по мгновенным значениям входного и дополнительных сигналов [1].

Значительное упрощение реализации обеспечивают методы измерения ИХГС, в которых в качестве дополнительных сигналов используются ортогональные составляющие сигналов (ОСС).

В статье приводится классификация и синтезируются методы измерения ИХГС по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов.

Принципы классификация методов измерения ИХГС с использованием ортогональных составляющих. Предлагается классифицировать методы измерения интегральных характеристик с использованием ОСС по следующим основным признакам: сравнение основного и дополнительного сигналов; связь с характерными точками сигналов; запоминание мгновенных значений сигналов для последующего сравнения; разделение мгновенных значений сигналов во времени (рис. 1).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00039-а).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., профессор), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), мл. научный сотрудник.

Антон Евгеньевич Сеницын, аспирант.

Исключая противоположные операции (связь или отсутствие связи с характерными точками сигналов; использование или отсутствие разделения во времени), а также учитывая тот факт, что запоминание мгновенных значений сигналов производится только с их последующим сравнением, можно условно выделить три группы, характеризующие принципы синтеза методов.



Рис. 1. Классификация методов измерения ИХГС с использованием ортогональных составляющих сигналов

Первую группу составляют методы, основанные на сравнении основного и дополнительного сигналов напряжения или тока. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *ACH*; *ACJ*; *ACFH*; *ACFJ*; *ADH*; *ADJ*; *AEH*; *AEJ*; *ADFH*; *ADFJ*; *ADGH*; *ADGJ*; *AEFH*; *AEFJ*; *AEGH*; *AEGJ*.

Вторую группу составляют методы, основанные на сравнении основного и дополнительного сигналов и напряжения, и тока. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *BCH*; *BCJ*; *BCFH*; *BCFJ*; *BDH*; *BDJ*; *BEH*; *BEJ*; *BDFH*; *BDFJ*; *BDGH*; *BDGJ*; *BEFH*; *BEFJ*; *BEGH*; *BEGJ*.

Наконец, третью группу составляют методы, не использующие сравнение основного и дополнительного сигналов. Для этой группы можно синтезировать следующие методы: *CH*; *CJ*; *DH*; *DJ*; *EH*; *EJ*.

Таким образом, представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 38 методов.

Синтез методов измерения ИХГС с использованием ортогональных составляющих. Рассмотрим примеры синтеза методов.

Метод *ACH*, представляющий первую группу методов, основан на сравнении ортогональных составляющих одного из сигналов. Метод предполагает формирование дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно основных на 90° ; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основного сигнала напряжения, основного и дополнительного сигналов тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [2].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 2.

Для входного напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и дополнительных сигналов напряжения $u_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos \omega t$ и тока $i_2(t) = I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ в момент времени t_1 , когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значе-

ний сигналов примут вид:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; \quad (1)$$

$$U_{21} = U_m \cos \alpha_1; \quad (2)$$

$$I_{11} = I_m \sin \alpha_2; \quad (3)$$

$$I_{21} = I_m \cos \alpha_2,$$

где U_m , I_m – амплитудные значения напряжения и тока; α_1 , α_2 – фазы сигналов напряжения и тока в момент времени t_1 ; $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1$ – угол сдвига фаз между сигналами напряжения и тока; ω – угловая частота входного сигнала.

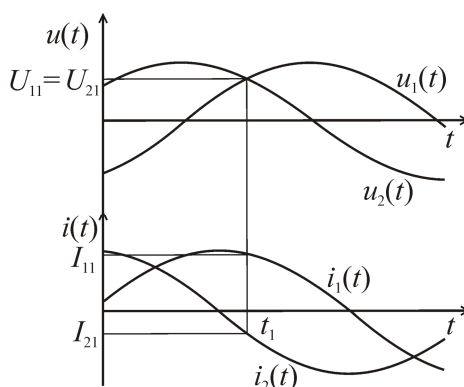


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Мгновенные значения U_{11} и U_{21} будут равны при угле $\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \pi l$, где $l = 0, 1$.

В этом случае выражения для определения основных ИХГС примут вид:
– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{\text{СКЗ}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = |U_{11}|; \quad (4)$$

$$I_{\text{СКЗ}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{I_{11}^2 + I_{21}^2}{2}};$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{U_m I_m \cos \varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{21} + I_{11})}{2};$$

$$Q = \frac{U_m I_m \sin \varphi}{2} = \frac{U_{11}(I_{11} - I_{21})}{2}.$$

Анализ показывает, что время измерения ИХГС не зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током, а определяется в основном временем между моментом начала измерения и моментом равенства мгновенных значений напряжений U_{11} и U_{21} .

Метод *BCH*, представляющий вторую группу методов, предполагает сравнение ортогональных составляющих сигналов и напряжения и тока. Метод основан на том, что формируют дополнительные сигналы напряжения и тока, сдвинутые относительно основных на 90° ; в момент равенства основного и дополнительного сигналов напряжения одновременно измеряют мгновенные значения основных сигналов напряжения и тока; в момент равенства основного и дополнительного сигналов тока измеряют мгновенные значения основных сигналов тока и напряжения и определяют ИХГС по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 3.

В момент времени t_1 , когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов будут соответствовать выражениям (1) – (3).

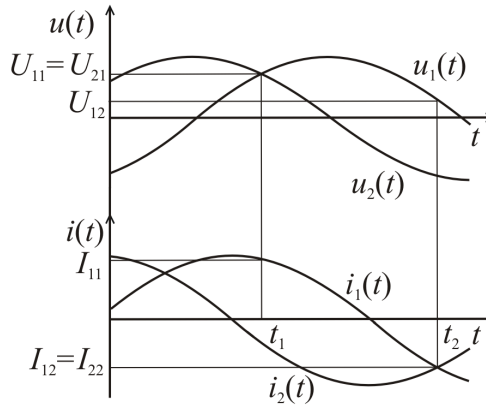


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие второй метод

В момент времени t_2 , когда будут равны основной и дополнительный сигналы тока, выражения для мгновенных значений сигналов будут иметь следующий вид:

$$I_{12} = I_m \sin \alpha_3; \quad I_{22} = I_m \cos \alpha_3; \quad U_{12} = U_m \sin(\alpha_3 - \varphi) = U_m \sin\left(\frac{\pi}{4} + \pi l - \varphi\right),$$

где α_3 – фаза сигнала тока в момент времени t_2 .

Мгновенные значения I_{12} и I_{22} будут равны при угле $\alpha_3 = \frac{\pi}{4} + \pi l$.

Для данного метода СКЗ напряжения соответствует выражению (4).

Остальные ИХГС можно определить с помощью выражений:

$$I_{СКЗ} = |I_{12}|; \quad P = \frac{U_{11} \left[I_{11} + \text{sign}(U_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2} \right]}{2};$$

$$Q = \frac{U_{11} \left[I_{11} - \text{sign}(U_{11}) \text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) \sqrt{2I_{12}^2 - I_{11}^2} \right]}{2}.$$

Анализ показывает, что время измерения ИХГС в данном методе возрастает, поскольку оно определяется не только временем между моментом начала измерения и моментом равенства мгновенных значений напряжений U_{11} и U_{21} , но и зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током. Однако при реализации метода требу-

ется измерять только мгновенные значения основных сигналов напряжения и тока.

Метод *СН*, относящийся к третьей группе методов, основан на определении интегральных характеристик сигналов по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно первых на угол 90° в сторону опережения [3].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 4.

Если сигналы напряжения и тока в исследуемой цепи имеют гармонические модели, то их мгновенные значения в момент времени t_1 равны

$$U_{11} = U_m \sin \alpha'_1; \quad U_{21} = U_m \sin \left(\alpha'_1 + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \cos \alpha'_1; \quad I_{11} = I_m \sin \alpha'_2;$$

$$I_{21} = I_m \sin \left(\alpha'_2 + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \alpha'_2,$$

где α'_1, α'_2 – фазы сигналов напряжения и тока в произвольный момент времени t_1 .

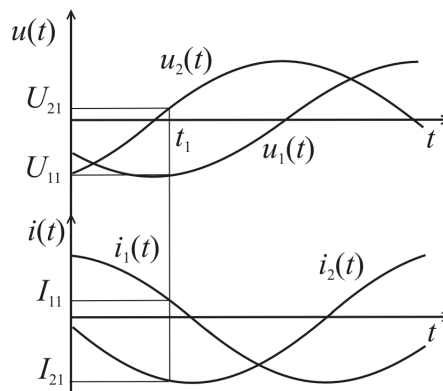


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие третий метод

Выражения для определения ИХГС принимают следующий вид:

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{U_{11}^2 + U_{21}^2}{2}}; \quad I_{CK3} = \sqrt{\frac{I_{11}^2 + I_{21}^2}{2}}; \quad P = \frac{U_{11}I_{11} + U_{21}I_{21}}{2}; \quad Q = \frac{U_{11}I_{21} - U_{21}I_{11}}{2}.$$

Анализ данного метода показывает, что время измерения не зависит ни от начала измерения, ни от угла сдвига фаз между напряжением и током. Таким образом, реализация метода обеспечивает существенное сокращение времени определения основных ИХГС.

Рассмотрим еще один метод, относящийся к третьей группе методов, который, в отличие от представленных ранее, использует характерные точки. Метод *ЕН* основан на том, что в момент перехода ортогональной составляющей сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент перехода ортогональной составляющей сигнала тока через ноль измеряют второе мгновенное значение входного тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [4].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 5.

Мгновенные значения сигналов в моменты времени t_1 и t_2 имеют вид

$$U_{11} = U_m \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -U_m; \quad I_{11} = I_m \sin \varphi; \quad I_{12} = I_m \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -I_m.$$

Основные ИХГС можно определить с помощью следующих выражений:

$$U_{CKЗ} = |U_{11}|; \quad I_{CKЗ} = |I_{12}|; \quad P = \frac{|U_{11}| |I_{11}|}{2}; \quad Q = \frac{\text{sign}(U_{12}) \text{sign}(I_{12}) |U_{11}| \sqrt{I_{12}^2 - I_{11}^2}}{2}.$$

Время измерения ИХГС в данном методе существенно увеличивается, поскольку определяется интервалом времени между моментом начала измерения и моментом перехода ортогональной составляющей сигнала напряжения через ноль, а также интервалом времени с данного момента времени до перехода ортогональной составляющей сигнала тока через ноль, то есть зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током. Однако при реализации метода исключается погрешность по напряжению (току) фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование ортогональных составляющих.

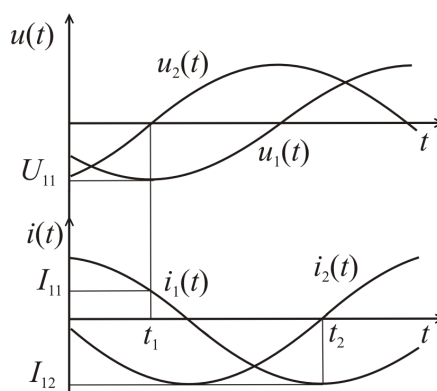


Рис. 5. Временные диаграммы, поясняющие четвертый метод

Общим недостатком средств измерений, реализующих рассмотренные методы, следует считать частотную погрешность ФСБ, которая возникает при изменении частоты входного сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сборник. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 129-131.
3. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Метод измерения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям их ортогональных составляющих // Современные инновации в науке и технике: Матер. II-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 123, 124.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2012 г.

THE SYNTHESIS OF METHODS OF MEASUREMENT OF INTEGRATED CHARACTERISTICS ON INSTANT VALUES OF ORTHOGONAL MAKING HARMONIOUS SIGNALS

V.S. Melentiev, JU.M. Ivanov, A.E. Sinitsyn

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Classification of methods of measurement of integrated characteristics by instant values with use of orthogonal harmonious signals is considered. The new approach to the synthesis of such methods is offered. Four methods synthesized on the basis of the given approach are examined.

Keywords: *integrated characteristics, harmonious signals, instant values, orthogonal components of signals, comparison of signals, characteristic points.*

*Vladimir S. Melentiev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Jury M. Ivanov (Ph.D. (Techn.)).
Anton E. Sinitsyn, Postgraduate Student.*

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМ СТЕНДОМ, МОДЕЛИРУЮЩИМ ОБЪЕМНЫЙ ГИДРОПРИВОД СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

Е.В. Мельников¹, Р.А. Клинов²

¹ Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева
443086, г. Самара, Московское ш., 34

E-mail: mevl234567890@mail.ru

Рассмотрен экспериментальный электрогидромеханический стенд, моделирующий объемный гидропривод судоходного шлюза. Описана система управления стендом. Приведены экспериментальные данные по результатам исследований. Предложен метод комбинированного управления объемным гидроприводом, уменьшающий ударные нагрузки на оборудование шлюза и повышающий КПД гидросистемы.

Ключевые слова: математическое моделирование, объект с распределенными параметрами, судоходный шлюз, управляющее воздействие, комбинированная система управления гидроприводом.

В настоящее время производится большой комплекс работ по реконструкции судоходных гидротехнических сооружений (СГТС). Основная часть СГТС в России была построена в середине прошлого века и в настоящее время выработала свой ресурс. Реконструкции подлежат как строительные элементы СГТС, так и системы контроля и управления.

Первоначально в качестве приводов подвижных элементов СГТС использовались механические лебедки. В настоящее время идет массовая замена механического привода на электрогидравлический. При этом возникает целый ряд вопросов, связанных с выбором метода управления приводом, контролем его технологических параметров и текущего состояния. Наибольшую сложность при автоматизации представляют подъемно-опускные ворота шлюзов, упрощенная модель которых представлена на рис. 1.

Ворота представляют собой сварную конструкцию весом до 450 т, шириной 30 м и высотой 15 м. Подъем и опускание ворот производится двумя гидроцилиндрами, находящимися на разных устоях шлюза, причем опускание ворот производится под их собственным весом, а подъем – путем подачи жидкости в подштоковую полость гидроцилиндра. Для синхронизации сторон ворот используются управляемые гидродрессели, сливающие жидкость, и управляемые гидронасосы. Максимальный перекося сторон ворот не должен превышать 60 мм, иначе происходит заклинивание ворот. Для контроля положения сторон ворот используются угловые энкодеры, механически связанные со сторонами ворот.

Динамика ворот шлюза описывается уравнениями поступательного движения поршней гидроцилиндров под действием сил давления, внешней нагрузки, сил трения и уравнениями расходов на входе P_i (P_i') и выходе P_j (P_j') с учетом сжимаемости

Евгений Владиславович Мельников (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Роман Александрович Клинов, ведущий инженер-конструктор.

жидкости в полостях цилиндра. Нелинейность движения ворот вызвана сжимаемостью жидкости и упругостью металлоконструкций ворот, нелинейными характеристиками трения в гидроцилиндрах и направляющих ворот, а также нелинейной характеристикой управляемых гидродросселей.

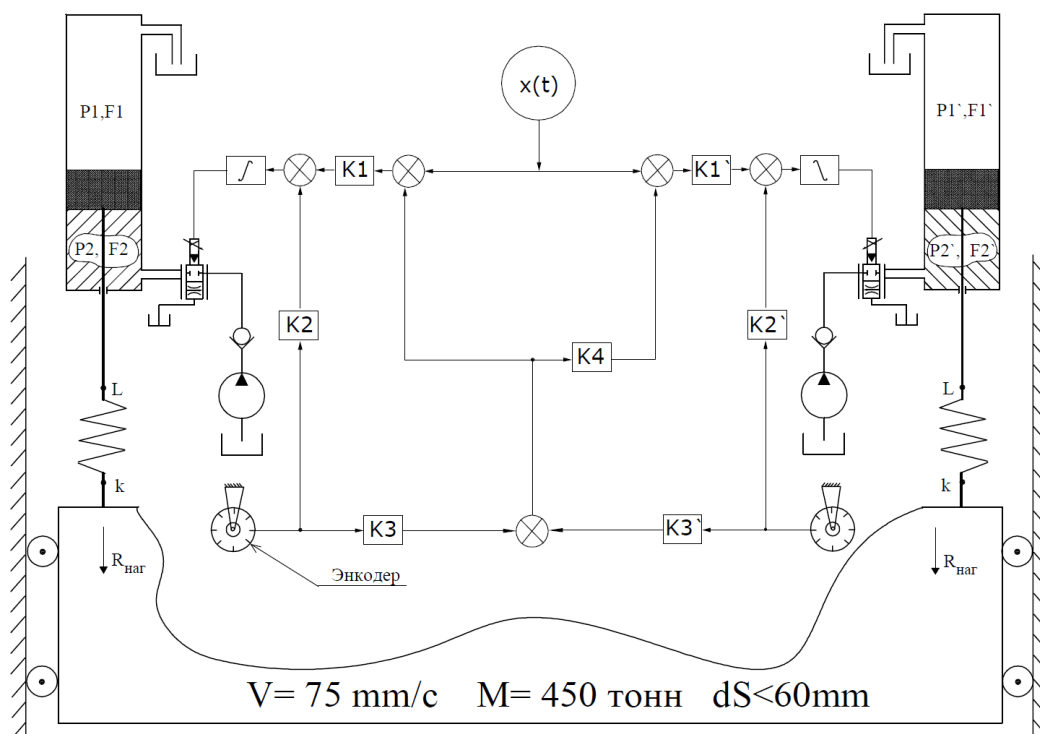


Рис. 1. Упрощенная модель ворот с функциональной схемой управления

В функциональной схеме управления приводом ворот (рис. 1) коэффициент $K1$ ($K1'$) описывает суммарный коэффициент податливости всех полостей, подключенных к напорной линии, который зависит от давления.

$K2$ ($K2'$) и $K3$ ($K3'$) – коэффициенты передачи соответствующих каналов функциональной схемы, $K4$ является коэффициентом неоднородности гидросистем сторон ворот.

Оптимальные программы перемещения ворот в различных технологических операциях предусматривают движение с непрерывно изменяющимися скоростями, т. е. в динамических режимах. Эффективность управления гидроприводом определяется динамической устойчивостью системы в целом и точностью воспроизведения программного режима. Так как коэффициенты системы $K1$ ($K1'$) – $K4$ ($K3'$) управления зависят от конструкции гидропривода, было принято решение произвести натурную реализацию гидропривода шлюза в масштабе 1:5. Ввиду большой стоимости оборудования была реализована только одна гидросистема [2], представляющая собой силовой механизм, состоящий из неподвижной станины и поворотного водила, к которому подсоединены рабочий и нагрузочный гидроцилиндры. Переменные давления в полостях нагрузочного гидроцилиндра моделируют внешнее усилие на ворота, вызванное трением, волновой и ветровой нагрузкой. Такая схема реализации

гидропривода позволяет моделировать гидросистемы подъемных и распашных ворот СГТС.

Структурная схема системы контроля и управления гидропривода приведена на рис. 2.

Система управления состоит из следующих элементов:

1) силовой шкаф, в котором установлены частотный преобразователь (ПЧ) и устройство плавного пуска (УПП), попеременно подключаемые к асинхронному электродвигателю гидронасоса. Также в силовом шкафу смонтирована система измерения электрических параметров электродвигателя;

2) основной шкаф управления, к которому подключены датчики Д1...Дн и исполнительные механизмы;

3) шкаф моделирования нагрузок, к которому подключены тензорезисторы, измеряющие деформации станины стенда, возникающие при приложении нагрузки;

4) управляющий компьютер;

5) асинхронный трехфазный электродвигатель с подсоединенным гидронасосом.

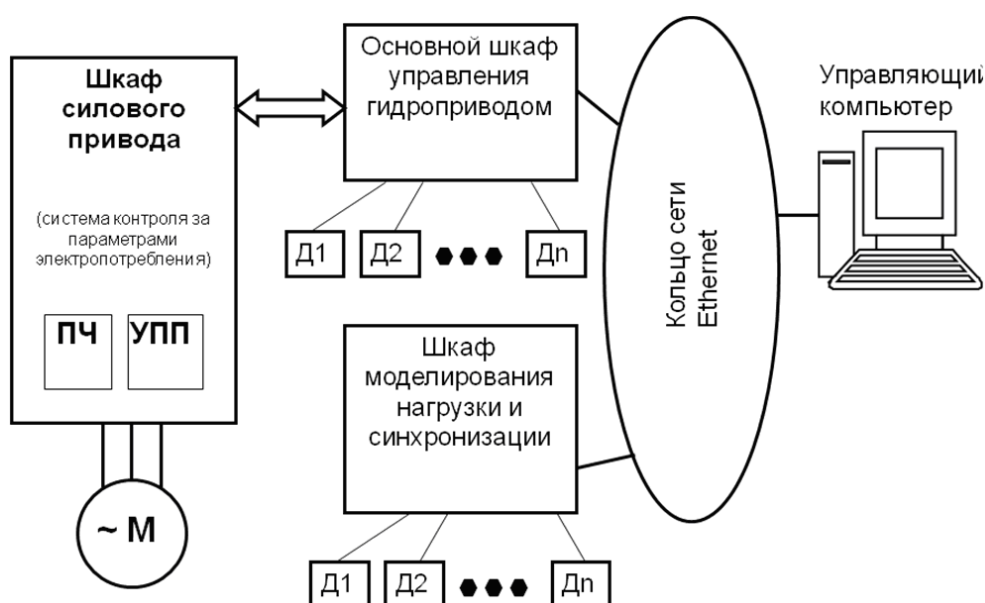


Рис. 2. Система контроля и управления гидроприводом

Все контроллеры и управляющий компьютер объединены в единое кольцо сети Ethernet, используется оборудование фирмы Schneider Electric.

При необходимости количество контролируемых параметров может быть легко увеличено путем добавления требуемых модулей в систему.

В табл. 1 и 2 приведены технические характеристики системы управления и контроля параметров экспериментального стенда и перечень установленных в данный момент на стенде датчиков.

Таблица 1

**Технические характеристики системы управления и контроля параметров
экспериментального стенда**

Параметр	Количество точек контроля и управления
Дискретный вход (24В)	32
Дискретный выход (релейный)	8
Аналоговый управляющий выход 4-20мА	4
Аналоговый вход 4-20мА, 0-10 В	16
Быстродействующие счетчики для подключения инкрементальных энкодеров	4
Каналы измерения температуры	8
Модули для подключения тензорезисторов	2
Интерфейсы для подключения интеллектуальных датчиков	2
Контроль параметров энергопотребления	18

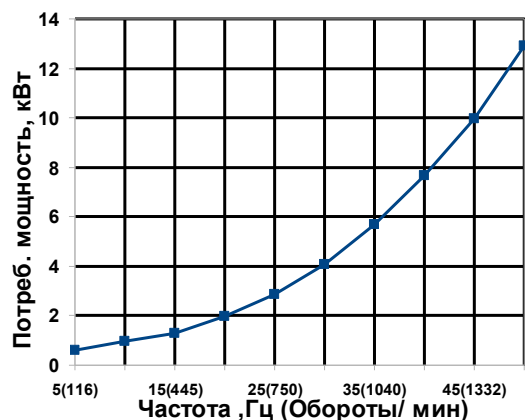
Таблица 2

Перечень установленных в данный момент на стенде датчиков

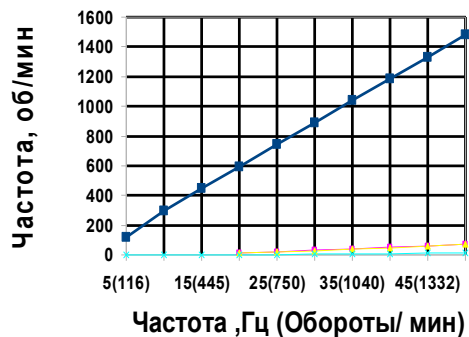
Тип измеряемого параметра	Кол-во	Точность, %
Датчики давления аналоговые	6	0,5
Электроконтактный манометр	1	1
Датчики температуры	4	0,1
Тензодатчики	2	1
Датчики расхода	2	0,5
Датчик линейного перемещения	1	0,1
Датчик поворота водила	4	0,1
Датчик уровня масла в баке	1	3 положения

Ниже приведены экспериментальные данные, полученные на стенде. Исследования проводились при изменении частоты питающего напряжения асинхронного электродвигателя гидронасоса от 20 до 50 Гц. При снижении частоты питания электродвигателя до 7 Гц происходит его останов. На рис. 3 приведены зависимости изменения потребляемой мощности, оборотов, крутящего момента на валу электродвигателя, производительности насоса и КПД гидросистемы.

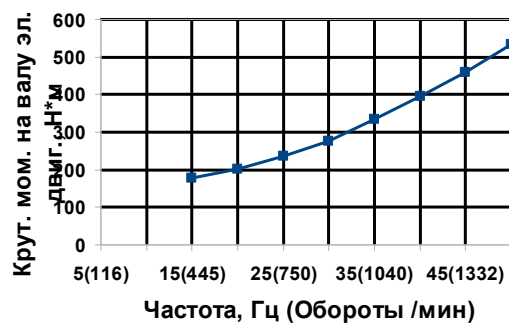
Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующий предварительный вывод: нагрузка на внешнем контуре имеет явно выраженный нелинейный характер с максимальными значениями в начале подъема ворот.



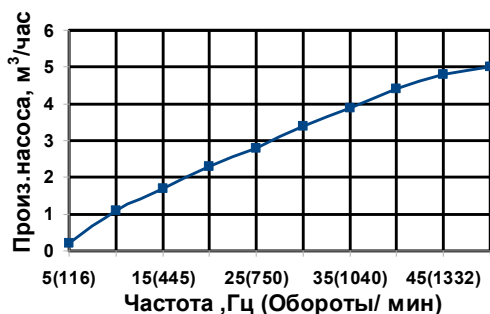
а



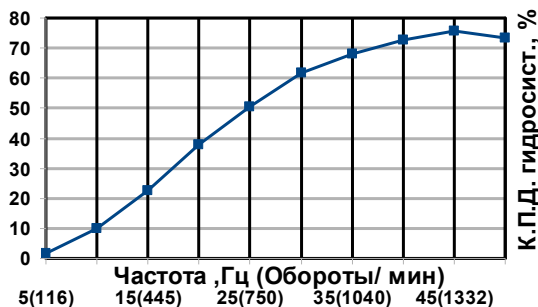
б



в



г



д

Рис. 3. Экспериментальные зависимости параметров гидросистемы питания комплекса при частотном регулировании:

а – потребляемая мощность, б – обороты электродвигателя, в – крутящий момент на валу электродвигателя, г – подача насоса, д – КПД гидросистемы

При чисто частотном регулировании параметров гидросистемы при положительном эффекте снижения расхода рабочей жидкости и энергопотребления отмеча-

ются следующие недостатки: уменьшается крутящий момент электродвигателя, что может привести к перегрузке или остановке гидропривода, снижается КПД насоса и гидросистемы в целом, увеличивается температура рабочей жидкости.

Нелинейность статических характеристик во внешних и внутреннем контурах гидропривода может привести к нестабильному перемещению ворот, ухудшению динамических характеристик (устойчивости, быстродействия, точности регулирования и др.). Пульсационная составляющая внешней нагрузки на ворота (порывы ветра, изменение направления ветровой нагрузки, волна от работающих судовых двигателей) является существенно дестабилизирующим фактором и приводит к осложнению частотной системы регулирования.

В работе предложена схема системы подъема ворот, при которой дроссельная система должна работать в начале цикла подъема ворот, когда требуются очень низкие подачи рабочей жидкости в гидроцилиндр при высоком давлении (отрыв ворот от основания). Частотная система должна использоваться для выполнения заданного технологического режима, синхронизации, в том числе при возникновении пульсационных нагрузок.

Предполагается, что применение совмещенной системы регулирования в составе дроссельного и частотного регулятора повысит показатели качества регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Г.В., Лобанов Р.Б., Немировский И.А. Синтез параметров программно управляемого гидропривода затвора судоходного шлюза // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. Вып. 13. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 35-42.
2. Морозов В.Н., Краснощеков И.Л., Красинский Д.Б., Мельников Е.В. Об организации исследований в области создания перспективных электрогидравлических приводов механического оборудования СГТС // Гидротехника 21 век. – 2012. – №2 май. – С. 26-30.

Статья поступила в редакцию 9 июля 2012 г.

THE CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRICAL HYDROMECHANICAL STAND SIMULATING A THREE-DIMENSIONAL HYDRAULIC GEAR OF A SHIP LOCK

E.V. Melnikov¹, R.A. Klinov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086

The experimental electrical hydromechanical stand simulating a three-dimensional hydraulic paddle gear of a ship lock is discussed. The stand control system is described. The experimental results data are given. A method for the combined control of the three-dimensional hydraulic paddle gear is proposed which reduces shock loads on the ship lock equipment and increases the efficiency of the hydraulic system.

Keywords: *mathematical modeling, an object with distributed parameters, navigation lock, the control action, combined hydraulic control system.*

*Evgeny V. Melnikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Roman A. Klinov, Engineer.*

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВ И ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

В.Н. Нестеров, А.Р. Ли

Самарский электромеханический завод
443099, г. Самара, ул. Ст. Разина, 16
E-mail: nesterov-ntc@rambler.ru

Представлен формальный аппарат, развивающий принцип двухканальности до уровня технологического метода построения инвариантных измерительных преобразователей. Рассмотрены его применения в процессе создания двухканальных измерительных мостов и делителей напряжения для приборов и систем специального назначения.

Ключевые слова: технологический метод, инвариантный преобразователь, измерительный мост, делитель напряжения.

Работа в жестких эксплуатационных условиях без участия человека требует реализации новых подходов к построению измерительных преобразователей, способных давать информацию с необходимой точностью в условиях воздействий как измеримых, так и неизмеримых внешних и внутренних возмущающих факторов. Принципы построения абсолютно инвариантных систем и систем с инвариантностью до ε , а также условия их физической реализуемости первоначально нашли применение в теории автоматического управления и регулирования [1-3]. Были высказаны идеи о связи теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем [4]. В то же время элементы теории инвариантности и, в частности, принцип двухканальности, сформулированный академиком Б.Н. Петровым [5], находят успешное применение в информационно-измерительной технике.

Представленный работами [6-19] класс инвариантных измерительных преобразователей в составе неравновесных измерительных мостов и делителей напряжения не исчерпывает возможности практической реализации принципа двухканальности для измерительных систем, а методические различия структурного и технологического методов, сформулированные в работе [20] для данного класса преобразователей, требуют дальнейшего методического развития. Последнее в особенности актуально в случае, когда оба метода работают в одной измерительной системе, но реализуют собственные методические признаки.

Положительной особенностью структурного метода, реализующего принцип двухканальности, является принципиальная возможность достижения в системе условий абсолютной инвариантности относительно влияющих факторов.

Однако в общем случае для любой измерительной системы и любых влияющих факторов метоодообразующие признаки структурного метода не всегда поддаются физической реализации. В этом случае закономерным представляется взгляд в сторону технологии.

Требования, предъявляемые к методам компенсации возмущающих воздействий

Владимир Николаевич Нестеров (д.т.н., профессор), заместитель генерального директора, начальник НТЦ ОАО «Самарский электромеханический завод».
Анжелика Романовна Ли, аспирант.

с помощью технологических мероприятий, должны учитывать особенности и специфику каждой конкретной системы и в силу этого представляют собой некое ноу-хау. Соответственно, решаемая задача может быть разделена на две. Первая из них заключается в формулировании признаков, отражающих принципиальную сущность технологического метода, вторая – в разработке методик, позволяющих реализовать данные признаки и выявить соответствующее технологическое ноу-хау.

Методообразующие признаки технологического метода, приводящие к уменьшению чувствительности системы к возмущающим воздействиям посредством технологических мероприятий, которые рассматриваются как необходимые, сформулированы в работе [20] следующим образом.

1. Наличие в структуре системы q элементов ($q \geq 2$), подверженных влиянию со стороны влияющих факторов ζ_j .

2. Реализуемость специальных технологических мероприятий, приводящих к «дифференциально-симметричному» воздействию влияющих факторов на параметры входящих в систему элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} - \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}} \right\} \rightarrow 0, \quad r \neq l; \quad r, l \in q, \quad (1)$$

где $\Delta k_{ir}(\zeta_j), \Delta k_{il}(\zeta_j)$ – отклонения k -го параметра соответственно r -го и l -го элементов i -го канала преобразования от номинальных значений k_{ir0}, k_{il0} под действием влияющих факторов ζ_j .

3. Выполнение критерия:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \frac{\partial F}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial k_{ij}(\zeta_j)} \Delta k_{ij}(\zeta_j) \rightarrow 0, \quad (2)$$

где F – результирующая функция преобразования системы; Y_i – функция преобразования i -го канала преобразования; n – количество каналов.

В предельном случае, если выражения вида (1) превратятся в тождество, критерий (2) достигает нулевого экстремума и можно говорить об абсолютной инвариантности системы относительно возмущающих воздействий, реализующейся за счет соответствующих технологических мероприятий. Однако такой случай является идеальным. Поэтому важной является методическая задача поиска технологических мер, приводящих к максимально близкому выполнению критерия (2).

Методика выявления технологического ноу-хау базируется на использовании критерия (2). Поскольку левая часть последнего представляет собой выражение погрешности, возникающей вследствие действия влияющих факторов на входящие в систему элементы, то, приравняв ее нулю и осуществив необходимые преобразования, представляется возможным в аналитическом виде

$$\frac{\Delta k_{ir}(\zeta_j)}{k_{ir0}} = \frac{\Delta k_{il}(\zeta_j)}{k_{il0}}, \quad r \neq l; \quad r, l \in q \quad (3)$$

найти условия минимизации названной погрешности. Последние и определяют технологическое ноу-хау, формулировка и физическая реализуемость которого в каждом конкретном случае зависят от физики влияющих факторов и конструктивно-технологического исполнения устройства.

Рассмотрим работу метода на характерных примерах представителей класса двухканальных измерительных преобразователей.

На рис. 1 показана схема двухканального неравновесного параллельно-симметричного моста с двумя рабочими плечами [6].

Напряжение, пропорциональное разности токов в преобразователях 1 и 2, снимается с измерительной диагонали моста, образованного преобразователями 1...4, а напряжение, пропорциональное сумме названных токов, – с зажимов преобразователя 5, включенного последовательно с источником питания 6. Суммирование названных токов i_1 и i_2 , протекающих в плечах моста, обеспечивается равенством параметров преобразователей 3, 4 и 5: $z_3 = z_4 = z_5 = z$. Тогда в соответствии с первым законом Кирхгофа на зажимах преобразователя 5 получаем: $z \cdot i = z \cdot (i_1 + i_2)$, где i – ток в диагонали питания. Измерительные усилители 7 и 8, обладая высоким входным сопротивлением, обеспечивают развязку каналов преобразования от схемы первичного преобразования.

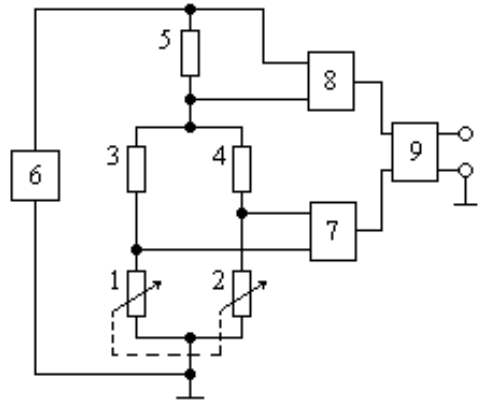


Рис. 1. Инвариантный измерительный параллельно-симметричный мост с двумя рабочими плечами

Напряжения на входах измерительных усилителей 7 и 8 определяются выражениями:

$$U_1 = \frac{(E - z_5 i) [(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3] [(z_2 - \Delta z) + z_4]}, \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{(E - z_5 i) z_5 [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}{[(z_1 + \Delta z) + z_3] [(z_2 - \Delta z) + z_4]}, \quad (5)$$

где $\frac{(E - z_5 i)}{[(z_1 + \Delta z) + z_3] [(z_2 - \Delta z) + z_4]}$ – симметричная составляющая функций преобразования измерительных каналов; $[(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]$ и $z_5 [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]$ – асимметричные составляющие функций преобразования измерительных каналов; E – ЭДС источника питания 6; $(z_1 + \Delta z)$ и $(z_2 - \Delta z)$ – значения параметров первичных преобразователей 1 и 2, z_1, z_2 – их начальные значения, Δz – информативные приращения; z_3, z_4, z_5 – значения параметров преобразователей 3, 4 и 5.

Сигналы $U_1^* = k_1 U_1$ и $U_2^* = k_2 U_2$ с выходов соответственно измерительных усилителей 7 и 8 поступают на входы устройства деления 9, на выходе которого

$$F_1 = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{k_1}{k_2} \frac{[(z_1 + \Delta z) z_4 - (z_2 - \Delta z) z_3]}{z_5 [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3 + z_4]}, \quad (6)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению измерительных усилителей 7 и 8.

При выполнении условий $k_1 = k_2$, $z_1 = z_2 = z_0$, $z_3 = z_4 = z_5 = z$ из (6) получаем результирующую функцию преобразования

$$F_1 = \frac{U_1^*}{U_2^*} = \frac{\Delta z}{(z_0 + z)}. \quad (7)$$

При этом

$$\Delta F_1 = \frac{\partial F_1}{\partial U_1^*} \frac{\partial U_1^*}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F_1}{\partial U_2^*} \frac{\partial U_2^*}{\partial E} \Delta E \equiv 0. \quad (8)$$

Тождественное равенство нулю критерия (8) подтверждает абсолютную инвариантность структуры преобразователя (см. рис. 1) относительно неустойчивости ЭДС источника питания 6.

Несмотря на достигнутые результаты в каналах преобразователя имеются элементы, неустойчивость которых может стать источником возникновения дополнительных погрешностей. Поэтому необходимы специальные меры для компенсации указанной неустойчивости.

Методика выявления технологического ноу-хау может быть получена в рамках сформулированного выше технологического метода.

Действительно, один из признаков названного метода требует наличия в структуре системы (преобразователя) q элементов ($q \geq 2$), подверженных влиянию со стороны влияющих факторов ζ_j .

Рассматривая данную схему, видим в ее составе три группы однотипных элементов: два первичных преобразователя 1 и 2, три преобразователя 3, 4 и 5, составляющих совместно с первыми двумя измерительный мост, и два измерительных усилителя 7 и 8.

Запишем и соответствующим образом структурируем выражение погрешности от действия влияющих факторов на указанные группы элементов преобразователя:

$$\begin{aligned} \Delta F_1 = & \frac{k_{10}/k_{20}}{z_{50}[(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30} + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}]} \left\{ \frac{z_{30}(z_1 + \Delta z)_0[(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}]}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}} \times \right. \\ & \times \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right] + \frac{z_{40}(z_2 - \Delta z)_0[(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}]}{(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} \left[\frac{\Delta z_4}{z_{40}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] + \\ & + \frac{(z_1 + \Delta z)_0 z_{40} - (z_2 - \Delta z)_0 z_{30}}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30} + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} \left\{ [(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}] \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right] + \right. \\ & + \left. [(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}] \left[\frac{\Delta(z_2 - \Delta z) + \Delta z_4}{(z_2 - \Delta z)_0 + z_{40}} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right] \right\} + [(z_1 + \Delta z)_0 z_{40} - (z_2 - \Delta z)_0 z_{30}] \left(\frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right) \Bigg\}, \quad (9) \end{aligned}$$

где $\Delta k_1, \Delta k_2$ – отклонения от номинальных значений k_{10} и k_{20} коэффициентов усиления по напряжению дифференциальных усилителей 7 и 8; $\Delta(z_1 + \Delta z), \Delta(z_2 - \Delta z), \Delta z_3, \Delta z_4, \Delta z_5$ – отклонения параметров элементов схемы 1...5 от их номинальных значений $(z_1 + \Delta z)_0, (z_2 - \Delta z)_0, z_{30}, z_{40}, z_{50}$ в результате воздействия дестабилизирующих факторов.

В соответствии с критерием (2), устремляя выражение (9) к нулю, выявляем необходимость «дифференциально-симметричного» влияния дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta z_3}{z_{30}} \right\} \rightarrow 0; \left\{ \frac{\Delta z_4}{z_{40}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + \Delta z_3} - \frac{\Delta z_5}{z_{50}} \right\} \rightarrow 0;$$

$$\left\{ \frac{\Delta k_1}{k_{10}} - \frac{\Delta k_2}{k_{20}} \right\} \rightarrow 0, \quad (10)$$

что является аналитическим выражением второго признака технологического метода.

Из (10) получаем условия компенсации воздействия дестабилизирующих факторов на соответствующие группы элементов преобразователя и, соответственно, на преобразователь в целом:

$$\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_3}{z_{30}}, \quad \frac{\Delta z_4}{z_{40}} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0}, \quad \frac{\Delta(z_1 + \Delta z) + \Delta z_3}{(z_1 + \Delta z)_0 + \Delta z_3} = \frac{\Delta z_5}{z_{50}} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z) + \Delta z_4}{(z_2 - \Delta z)_0 + \Delta z_4},$$

$$\frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}. \quad (11)$$

Измерительный преобразователь, схема которого показана на рис. 2, обладает более простой структурой. Однако и здесь реализованы симметрия каналов преобразования относительно источника питания и асимметрия относительно информативной измеряемой величины. Преобразователь содержит два дифференциально включенных первичных преобразователя 1 и 2, третий преобразователь 3, выполненный в виде резистора, которые соединены в последовательную цепь с источником питания 4. Измерительные усилители 5 и 6 с высоким входным сопротивлением обеспечивают каналы преобразования, симметричные относительно источника питания (4). Напряжения на выходах измерительных усилителей 5 и 6 определяются выражениями

$$U_1 = \frac{k_1 E [(z_1 + \Delta z) + z_3]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}; \quad (12)$$

$$U_2 = \frac{k_2 E [(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z)]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}, \quad (13)$$

где $[(z_1 + \Delta z) + z_3]$, $[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z)]$ – асимметричные составляющие функций преобразования каналов, удовлетворяющие условию (2); E – ЭДС источника питания 4; k_1 и k_2 – коэффициенты передачи по напряжению соответственно измерительных усилителей 5 и 6; $(z_1 + \Delta z)$ и $(z_2 - \Delta z)$ – значения параметров преобразователей 1 и 2, где z_1 и z_2 – начальные значения параметров, а Δz – информативное приращение параметров; z_3 – значение параметра преобразователя 3.

Сигналы (12) и (13) подаются соответственно на прямой и инвертирующий входы дифференциального усилителя 7, на выходе которого при выполнении условия $k_1 = k_2 = k$ получаем разностный сигнал

$$U_1 - U_2 = \frac{k E [z_3 - (z_2 - \Delta z)]}{[(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + z_3]}. \quad (14)$$

Далее сигналы (13) и (14) обрабатываются блоком 8 деления, на выходе которого при выполнении условия $z_1 = z_2 = z_3 = z$ получаем выходной сигнал

$$F_2 = \frac{U_1 - U_2}{U_2} = \frac{\Delta z}{2z}. \quad (15)$$

Как и в предыдущем случае, для (15) получаем

$$\Delta F_2 = \frac{\partial F_2}{\partial U_1} \frac{\partial U_1}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F_2}{\partial U_2} \frac{\partial U_2}{\partial E} \Delta E \equiv 0. \quad (16)$$

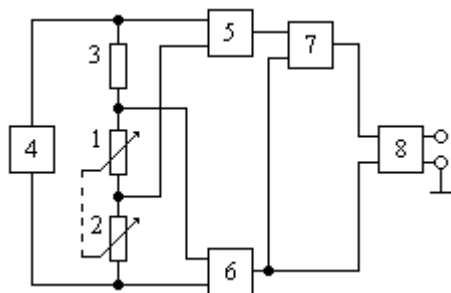


Рис. 2. Двухканальный полумостовой измерительный преобразователь

Таким образом, и в этом преобразователе обеспечена абсолютная инвариантность относительно нестабильности ЭДС источника питания.

В рамках предлагаемой методики выявляем в составе измерительного преобразователя (см. рис. 2) две группы однотипных элементов: преобразователи 1 – 3, выполненные в виде резисторов, и измерительные усилители 5 и 6.

Соответствующим образом структурированное выражение погрешности от действия влияющих факторов на указанные группы элементов записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta F_2 = & \frac{[(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}]}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0]} \left\{ \left(\frac{\Delta k_1}{k_0} - \frac{\Delta k_2}{k_0} \right) + \frac{(z_1 + \Delta z)_0 (z_2 - \Delta z)_0}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}][(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}]} \right\} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] + \frac{(z_2 - \Delta z)_0 z_{30} [2(z_1 + \Delta z) + (z_2 - \Delta z) + \Delta z]}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}][(z_1 + \Delta z)_0 + z_{30}][(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0]} \times \\ & \times \left[\frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right] + \frac{(z_1 + \Delta z)_0 z_{30}}{[(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0 + z_{30}][(z_1 + \Delta z)_0 + (z_2 - \Delta z)_0]} \left[\frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} \right] \Bigg\}, \quad (17) \end{aligned}$$

где $\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0}$, $\frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0}$, $\frac{\Delta z_3}{z_{30}}$, $\frac{\Delta k_1}{k_0}$, $\frac{\Delta k_2}{k_0}$ – относительные изменения соответственно параметров элементов 1, 2, 3 схемы и коэффициентов передачи измерительных усилителей 5, 6 под действием влияющих факторов.

Выражение погрешности (17) устремится к нулю при «дифференциально-симметричном» влиянии дестабилизирующих факторов на параметры соответствующих групп элементов:

$$\left\{ \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta z_{30}}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0; \quad \left\{ \frac{\Delta z_3}{z_{30}} - \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} \right\} \rightarrow 0;$$

$$\left\{ \frac{\Delta k_1}{k_0} - \frac{\Delta k_2}{k_0} \right\} \rightarrow 0. \quad (18)$$

Объединяя последние, из (18) получаем условия компенсации воздействия дестабилизирующих факторов на соответствующие группы элементов преобразователя, представляемые аналитически в следующем виде:

$$\frac{\Delta(z_1 + \Delta z)}{(z_1 + \Delta z)_0} = \frac{\Delta(z_2 - \Delta z)}{(z_2 - \Delta z)_0} = \frac{\Delta z_3}{z_{30}}; \quad \frac{\Delta k_1}{k_0} = \frac{\Delta k_2}{k_0}. \quad (19)$$

Анализ (11) и (19) позволяет сформулировать технологические мероприятия, касающиеся соответствующих групп элементов рассмотренных преобразователей и позволяющие осуществить компенсацию действующих на них возмущающих факторов:

- элементы, составляющие группу, должны быть технологически идентичными, например, выполненными из одного и того же материала, изготовленными на основе идентичных комплектующих, взятыми из одной партии и т. д.;
- элементы, составляющие группу, должны находиться в идентичных условиях относительно любых возмущающих воздействий.

В рассмотренных преобразователях реализуются вычислительные операции, которые, безусловно, вносят свою долю в суммарную погрешность системы. Применение цифровых микросхем, специально разработанных для построения интеллектуальных датчиков, например микросхем серии ADUC 8XX (производитель Analog Devices), которые имеют в своем составе аналого-цифровые преобразователи, специализированный микроконтроллер, источник питания для параметрических преобразователей и т. д., позволяет минимизировать погрешности вычислительных операций, особенно в части влияния возмущающих факторов. В то же время предложенные в работе подходы оказываются эффективными и в случае реализации вычислительных операций на аналоговых элементах.

Таким образом, как следует из примеров, приведенных здесь и в работах, на которые имеются ссылки, системный подход, реализованный технологически, эффективен и позволяет на единой основе решать задачи создания измерительных преобразователей, предназначенных для работы в условиях действия неизвестных возмущающих воздействий, что особенно актуально для приборов и систем специального назначения.

Важность разделения методов повышения точности измерительных устройств на структурные и технологические подтверждается имеющимися случаями неправомерного их использования. В частности, в работе [21] представлен анализ двухканальной структуры шестиплечного моста, где именно технологический подход позволил добиться поставленного результата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульбакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах // ДАН СССР. – 1948. – Т. 60. – №2. – С. 231-234.
2. Петров Б.Н., Кухтенко А.И. Структуры абсолютно инвариантных систем и условия их физической реализуемости / Теория инвариантности в системах автоматического управления: Тр. Всесоюз. совещания. – М.: Наука, 1964. – С. 24-28.
3. Хрусталева М.М. Необходимые и достаточные условия слабой инвариантности // Автоматика и телемеханика. – 1968. – №4. – С. 17-22.
4. Ивахненко А.Г. Связь теории инвариантности с теорией стабильности измерительных систем // Автоматика. – 1960. – №5. – С. 35-40.
5. Петров Б.Н., Викторова В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измеритель-

- ной технике. – М.: Наука, 1976. – 244 с.
6. Пат. 1795375 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Способ построения инвариантной измерительной цепи и инвариантный измерительный мост Нестерова В.Н. / В.Н. Нестеров. – № 4828085/21; Заявл. 24.05.90; Опубл. 15.02.93. Бюл. № 6.
 7. Пат. 2071063 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный мост / В.Н. Нестеров. – № 5032048/09; Заявл. 11.02.92; Опубл. 27.12.96. Бюл. № 36.
 8. Пат. 2071064 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный мост / В.Н. Нестеров. – № 5033661/09; Заявл. 11.02.92; Опубл. 27.12.96. Бюл. № 36.
 9. Пат. 2072730 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный мост / В.Н. Нестеров. – № 94004918/28; Заявл. 10.02.94; Опубл. 27.01.97. Бюл. № 3.
 10. Пат. 2117304 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Инвариантный измерительный мост / В.Н. Нестеров. – № 93045838/09; Заявл. 27.09.93; Опубл. 10.08.98. Бюл. № 22.
 11. Пат. 2068550 РФ, МКИ G 01 L 3/10. Измеритель крутящего момента / В.Н. Нестеров. – № 5042819/28; Заявл. 20.05.92; Опубл. 27.10.96. Бюл. № 30.
 12. Пат. 2117951 РФ, МКИ G 01 R 15/04. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения / В.Н. Нестеров. – № 93001746/09; Заявл. 11.01.93; Опубл. 20.08.98. Бюл. № 23.
 13. Пат. 2118826 РФ, МКИ G 01 R 15/04. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя напряжения / В.Н. Нестеров. – № 93001747/09; Заявл. 11.01.93; Опубл. 10.09.98. Бюл. № 25.
 14. Пат. 2121148 РФ, МКИ G 01 R 15/04. Инвариантный измерительный преобразователь в виде делителя / В.Н. Нестеров. – № 5041517/09; Заявл. 24.02.92; Опубл. 27.10.98. Бюл. № 30.
 15. Пат. 21807334 РФ, МКИ G 01 L 3/10, 3/00. Устройство для измерения крутящего момента / К.В. Жеребятьев, В.Н. Нестеров. – № 2000101301/28; Заявл. 17.01.2000; Опубл. 20.03.02. Бюл. № 8.
 16. Пат. 2184358 РФ, МКИ G 01 L 3/10, 3/04, 3/02. Устройство для измерения крутящего момента / К.В. Жеребятьев, В.Н. Нестеров. – № 2000130526/28; Заявл. 05.12.2000; Опубл. 27.06.02. Бюл. № 18.
 17. Пат. 2203479 РФ, МКИ G 01 L 5/00. Устройство для измерения крутящего момента / К.В. Жеребятьев, В.Н. Нестеров. – № 2000130581/28; Заявл. 05.12.2000; Опубл. 27.04.03. Бюл. № 12.
 18. Пат. 2297009 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Измерительный преобразователь / В.Н. Нестеров, В.М. Мухин. – № 2005136753/28; Заявл. 25.11.2005; Опубл. 10.04.2007. Бюл. № 10.
 19. Пат. 2297638 РФ, МКИ G 01 R 17/10. Измерительный преобразователь / В.Н. Нестеров, В.М. Мухин. – № 2005140832/28; Заявл. 26.12.2005; Опубл. 20.04.2007. Бюл. № 11.
 20. Нестеров В.Н. Структурный и технологический методы в задачах построения инвариантных измерительных преобразователей // Измерительная техника. – 2007. – № 2. – С. 8-12.
 21. Нестеров В.Н. Инвариантные измерительные мосты для измерения крутящего момента // Метрология. – 1992. – № 12. – С. 28-36.

Статья поступила в редакцию 29 февраля 2012 г.

A TECHNIQUE OF INVARIANT MEASURING CONVERTER DESIGNING ON THE PATTERN OF MEASURING BRIDGES AND VOLTAGE DIVIDERS

V.N. Nesterov, A.R. Li

Samara Electromechanical Factory
16, St. Razin st., Samara, 443099

The formal method which develops the principle of two channels into a technique of invariant measuring converter designing is presented. Its applications in the designing of two-channel measuring bridges and voltage dividers for special purpose devices and systems are discussed.

Keywords: *a technological method, the invariant converter, the measuring bridge, a voltage divider.*

*Vladimir N. Nesterov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anzhelika R. Li, Postgraduate Student.*