

УДК [622.673.1: 681.514.54]

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ КОНТРОЛЯ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В. В. Лопатин

*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова
Национальной академии наук Украины ул. Симферопольская 2а,
г. Днепропетровск, 49005. тел. (0562) 46-01-51, факс (0562) 46-24-26
e-mail nanu@igtm.dp.ua*

Описано основні проблеми, що виникають в багатоканальних мобільних системах контролю (МСК) при виборі датчиків для забезпечення необхідної похибки контролю. Запропоновано обґрунтовані підходи обробки багатоканальними МСК великого обсягу фактичних даних з урахуванням специфіки багатоканального контролю. Досліджено основні методи вимірювання дисперсії, показані їх переваги та недоліки. Розглянуто синтез обробки в багатоканальній МСК, за чинною принципом грубого і точного наближення і реалізує ітераційний алгоритм послідовних наближень, що може істотно розширити і підвищити ефективність контролю без зміни схеми апаратури.

Ключові слова: багатоканальна мобільна система контролю (МСК), похибка, синтез обробки, компенсація перешийок, принцип ітераційного уточнення.

Описаны основные проблемы, возникающие в многоканальных мобильных системах контроля (МСК) при выборе датчиков для обеспечения необходимой погрешности контроля. Предложены обоснованные подходы обработки многоканальными МСК большого объема фактических данных с учетом специфики многоканального контроля. Исследованы основные методы измерения дисперсии, показаны их достоинства и недостатки. Рассмотрен синтез обработки в многоканальной МСК, работающей по принципу грубого и точного приближения и реализующего итерационный алгоритм последовательных приближений, что может существенно расширить и повысить эффективность контроля без изменения схемы аппаратуры.

Ключевые слова: многоканальная мобильная система контроля (МСК), погрешность, синтез обработки, компенсация помех, принцип итерационного уточнения.

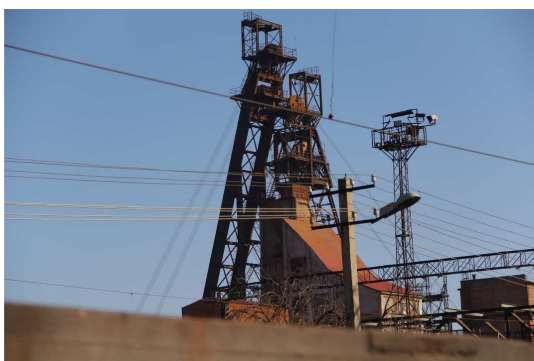
The basic problems in multichannel mobile control system (MCS) in the selection of sensors to provide the necessary control error. Propose reasonable multichannel MCS treatment approaches a large amount of evidence, taking into account the specifics of multi-channel control. The basic methods of measuring dispersion, showing their advantages and disadvantages. Considered the synthesis processing in a multi-MCS, working on the principle of the coarse and fine approximation and implements an iterative algorithm of successive approximations, which can significantly extend and improve the efficiency of the control circuits without changing the hardware.

Keywords: multi-channel mobile control system (MCS), metrological error, synthesis processing, noise compensation, the principle of iterative refinement.

Постановка проблеми

Одной из главных проблем развития экономики Украины является обеспечение государственного и особенно частного производств системами контроля, в которых постоянно ощущается недостаток. В то же время современные темпы научно-технического прогресса предъявляют все возрастающие требования к точности контрольной аппаратуры. При этом речь идет не об образцовых средствах измерения, а об аппаратуре, непосредственно применяемой в

производстве. Поэтому во многих случаях приходится использовать предельные возможности методов и средств контроля. В этих ситуациях правильная оценка точности имеющихся средств контроля и правильное обоснование требуемой точности контроля имеют важное значение для Украины. Особенно это касается горнодобывающей и нефтяной отраслей, которые играют решающую роль в украинской экономике и ее экспорте (рис.1-2).



**Рисунок 1 – Шахта «Октябрьская»
(г. Кривой Рог)**

Проблема усугубляется нежеланием по тем или иным причинам создавать прогрессивные методы и технические средства объективного контроля. Выяснение объективных причин сложившейся ситуации с системами контроля выходит за рамки данной статьи.



**Рисунок 2 – Нефтяная скважина ООО
«Азовская Нефтяная Компания»**

Рассмотрим основные определения [1], с которыми возникают трудности и разногласия в понимании нашего вопроса, так как в повседневном обиходе встречаться с ними не приходится. *Точность (погрешность)* – степень отличия результата измерения от точного значения, связанного с эталоном единицы физической величины. *Разрешающая способность* показывает, какое минимальное отклонение измеряемой величины может быть зарегистрировано измерительным прибором. *Порог чувствительности* – наименьшее значение физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным прибором.

Порог чувствительности, который определяет погрешность контроля, может быть гораздо больше, чем разрешающая способность, поскольку при определении погрешности учитывают:

- нелинейность измерительного прибора во всем диапазоне измерений;
- технологический разброс метрологических параметров от прибора к прибору;

- динамику процесса контроля.

Возникшее противоречие можно разрешить созданием мобильных систем контроля (МСК). В МСК не только систематическая, но и случайная компонента погрешности может быть уменьшена до уровня МЗР МСК путем многократных измерений с последующим усреднением результатов. Например, рассмотрим многофункциональный АЦП типа РС1А-71 фирмы «Advantech», применяемый в МСК типа «МАК-1» и «МАК-2», а также универсальный модуль ввода-вывода типа USB-4711 фирмы «Advantech», применяемый в МСК типа «МАК-3», «МАК-4» и экспериментальном МСК ИФНТУНГ [2]. В диапазоне измерений – 10...+10В рассматриваемые выше приборы имеют погрешности $\pm 0,05\%$, их порог чувствительности равен $\pm 5\text{мВ}$. Однако благодаря наличию 12-разрядного АЦП, эти приборы могут различать два входных сигнала, отличающиеся на 0,4 мВ, то есть их разрешающая способность в ± 12 раз выше порога чувствительности. Разрешающая способность не зависит от вышеперечисленных факторов, и это объясняет ее отличие от порога чувствительности и погрешности. Разрешающая способность увеличивается при уменьшении случайной составляющей погрешности. Заметим, что это справедливо только при условиях, указанных в работе [2], т.е. погрешность в МСК является чисто систематической.

Приведем, несколько примеров из собственной практики контроля, когда требования к погрешности на несколько порядков могут отличаться от требований к разрешающей способности.

Например, для контроля температуры в горной выработке используются датчики температуры с погрешностью измерений 2°C , то для контроля температуры в диапазоне $0...100^\circ\text{C}$ достаточно 50 уровней квантования, что может быть обеспечено 6-разрядным АЦП. Если использовать штатную аппаратуру контроля с модулем типа NL-8AI, содержащим 16-разрядный АЦП, разрешающая способность составляет $0,0015^\circ\text{C}$. Это позволяет фиксировать факт роста температуры горной выработки и расположить датчики температуры на достаточно большом расстоянии один от другого.

Когда требуется обнаружить момент времени начала разрушения контролируемого объекта МСК (например, редуктора станка-качалки), то необходим датчик с высокой

разрешающей способностью, но не обязательно с высокой точностью.

Для оценки параметров колебательного процесса жесткой армировки шахтного ствола МСК находится соотношение ординат или абсцисс функции в разных ее точках, то есть пропорции между отдельными частями графика, которые не зависят от самого значения функции. Поэтому такой контроль может быть выполнен датчиком типа МП-95, имеющим низкую точность, но высокую разрешающую способность. Дополнительным требованием в этом случае является достаточная линейность канала контроля и датчика МП-95 в контролируемом диапазоне [2], что было подтверждено почти 20-летней практикой применения датчика МП-95 (до МСК типа «МАК-3»).

Для улучшения разрешающей способности при низкой точности в МСК используется «электронная лупа». В основе принципа работы «электронной лупы» лежит свойство любых нелинейностей $f(x)$ приближаться к линейным зависимостям

$$f(x_0 + \Delta x) \approx \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \Delta x$$

при малых Δx , что обеспечивает отсутствие нелинейных искажений формы исследуемого сигнала. Работа «электронной лупы» в МСК состоит в том, что из исследуемого сигнала вычитается некоторый постоянный уровень $f(x_0)$, а разность квантуется АЦП с высокой разрядностью. При этом величина постоянного уровня может быть задана с низкой точностью, поскольку целью является измерение соотношений отдельных участков сигнала между собой, а не относительно единицы контролируемого физического параметра.

Заметим, что понятие разрешающая способность отсутствует в действующем на Украине руководстве по метрологии РМГ 29-99 [3]. По мнению автора, причина в том, что данное понятие не связано с измерением как операцией сличения с эталоном, но связано с оценкой отношений между физическими величинами, ни одна из которых не является эталоном, а это согласно РМГ 29-99 не относится к измерениям.

Точность, разрешающая способность и порог чувствительности в общем случае выше у АЦП с большим числом двоичных разрядов, хотя прямой связи здесь нет. АЦП с высокой разрядностью может иметь большой уровень шумов, высокую нестабильность источника опорного напряжения и связанную с этими особенностями низкую точность и надежность. Примером можно назвать встроенный контроллер типа А-821РGN фирмы «ICP», содержащий многоканальный

высокоскоростной программно-управляемый АЦП [4]. Большой уровень шумов контроллера типа А-821РGN, высокая нестабильность источника опорного напряжения и связанные с этими особенностями низкие точность и надежность, а также особенности сложного программного обеспечения программно-управляемого АЦП стали основными причинами того, что данная работа [4] не получила дальнейшего развития.

В эксплуатационной документации МСК указана погрешность, куда входит как систематическая, так и случайная составляющая. Согласно ныне действующего ГОСТ 8.009-84, если случайная составляющая превышает 10% от систематической, то она в обязательном порядке указывается отдельно, но для некоторых видов контроля МСК случайная составляющая указывается с помощью автокорреляционной функции.

Успешное решение задач точности контроля МСК зависит от того, насколько правильно выбран математический аппарат, используемый при данных решениях. Общепринято описание погрешностей измерения (контроля) с помощью методов теории вероятностей и математической статистики [5]. Это обстоятельство нашло свое отражение и во многих нормативных документах Украины, в частности в Государственных стандартах по метрологии (группа 8) и по прикладной статистике (группа 11). Например, как правило, случайными являются изменения влияющих величин, определяющих дополнительную погрешность аппаратуры контроля. Следствием этого является наличие случайных ошибок при допусковом контроле МСК.

Анализ публикаций

В многоканальных МСК основная динамическая ошибка измерений обусловлена быстро изменяющимся контролируемым параметром $x(t)$, и, следовательно, коррекции, вносимые каналами МСК в выходную величину $y(t)$, должны быть направлены на уменьшение динамической ошибки.

Как известно, в МСК необходимо в автоматическом режиме измерять дисперсию контролируемого параметра на фоне помех. Минимальное приращение дисперсии при этом определяется порогом чувствительности МСК и различными методами измерения дисперсии.

Порогом чувствительности МСК принимается (является) то значение дисперсии сигнала контролируемого параметра, при котором оно равно среднеквадратическому отклонению результатов контролируемого параметра.

По нашему мнению существуют четыре основных метода измерения дисперсии: компенсационные, со сравнением, модуляционные и корреляционные. Хотя существуют и другие мнения по этому вопросу, например [5].

Практическая реализация **компенсационного метода** измерения дисперсии осуществляется следующим образом:

- сигнал контролируемого параметра возводится в квадрат;
- составляющая, пропорциональная дисперсии суммарного сигнала, выделяется с помощью интегратора (сглаживающего фильтра нижних частот);
- собственные шумы аппаратуры предварительно компенсируются.

Недостатком этого метода является низкая чувствительность, обусловленная наличием медленных изменений дисперсии собственных шумов и случайных изменений коэффициентов аппаратуры, что приводит к нарушению условий компенсации.

Практическую реализацию **метода измерения дисперсии со сравнением** можно представить как двухканальную компенсационную. Так как дисперсия регулируется, то процесс измерения сводится к методу измерения с нулевым отсчетом. Естественно, что оценка дисперсии будет несмещенной. Поэтому погрешность этого метода меньше, чем с непосредственным отсчетом.

Процесс измерения дисперсии со сравнением можно автоматизировать с использованием следящего устройства, т.к. знак выходного сигнала зависит от того, дисперсия какого канала больше.

Из-за наличия второго канала результирующая дисперсия увеличивается и в два раза превышает дисперсию оценки компенсационного метода. Время наблюдения, соответствующее порогу чувствительности, также увеличивается в два раза по сравнению с временем анализа, необходимым при компенсационном методе.

Недостатком этого метода кроме вышесказанного является наличие статистической связи между каналами.

Практическая реализация **корреляционного метода** измерения дисперсии осуществляется двумя независимыми каналами, выходные сигналы которых подаются на умножитель, соединенный с интегратором. Собственные шумы каналов между собой независимы, поэтому их взаимная корреляционная функция равна нулю, в то время как взаимная корреляционная функция контролируемого процесса отлична от нуля и в совпадающие моменты времени численно равна дисперсии

анализируемого процесса. Так как при корреляционном методе происходит компенсация более высоких моментов сигнала помехи, а также компенсация погрешностей, вызванных случайными изменениями коэффициентов, то чувствительность корреляционного метода дисперсии несколько выше, чем чувствительность компенсационного.

Недостатком этого метода являются все вышеперечисленные недостатки корреляционного. Кроме того, ему присущи погрешности за счет неидеальности умножителей, т.к. перемножение процессов сводится к квадратичному преобразованию их суммы и разности.

Практическая реализация **модуляционного метода** осуществляется периодическим подключением к каналу МСК. Оценка дисперсии модуляционного метода является несмещенной, как и при компенсационном методе.

Относительное значение дисперсии оценки, определяющее чувствительность модуляционного метода, в два раза превышает относительную дисперсию компенсационного метода при одинаковых условиях контроля. Это объясняется двукратным уменьшением времени наблюдения контролируемых процессов за счет переключения. Из-за двукратного уменьшения времени наблюдения оценка дисперсии при модуляционном методе будет в два раза больше, чем при методе сравнения.

В известных публикациях не разработаны достаточно обоснованные подходы обработки многоканальными мобильными системами контроля большого объема фактических данных с учетом специфики контроля многоканальными мобильными системами. Поэтому представляется целесообразно разработать теорию обработки многоканальными мобильными системами контроля большого объема фактических данных для описания их работы. Рассмотрим связь контролируемых МСК параметров и поясним природу явления компенсации помех в них.

Анализ мобильных систем контроля (МСК), приведенный в работе [2], показывает, что до настоящего времени существует значительный разрыв между теорией и аппаратурными методами. На наш взгляд одна из причин в том, что в соответствии с основными положениями математической статистики величины и функции, характеристики контролируемых процессов, определяются как результат усреднения в соответствии с соотношением

$$\bar{\Xi}_x(v) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g[x_i(t)], \quad (1)$$

где $\bar{\Xi}_x$ - контролируемая характеристика, N - число реализаций, по которым производится

усреднение, $g[X]$ – оператор преобразования, лежащий в основе определения характеристики Ξ , $x_i(t)$ – i -я реализация контролируемого процесса.

Однако на практике обработки МСК в подавляющем числе случаев используются алгоритмы, основанные на усреднении по времени

$$\Xi_x(\nu) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g[x_i(t')] dt', \quad (2)$$

где Ξ – контролируемая характеристика, T – интервал усреднения, $g[X]$ – оператор преобразования, лежащий в основе определения характеристики Ξ , $x_i(t')$ – i -я реализация от t' контролируемого процесса.

Теоретически использование зависимостей (1), (2) объясняется тем, что в основу определения вероятностных характеристик при аппаратном анализе положено использование совокупности реализаций случайного процесса, а не вероятностной меры. Эта подмена не вызывает сомнения в правомерности, если контролируемый процесс стационарен и эргодичен [6]. Однако при контроле характеристик нестационарных использование зависимости (2) может привести к большим погрешностям.

Общепризнанные специалисты в области аппаратного анализа случайных процессов, например, J. Bendat, A. Piersol, Е.И. Куликов, Э.И. Цветков, П.Е. Эльясенберг и др. в последнее время всё чаще указывают на недопустимость замены усреднения по совокупности усреднением по времени при измерении вероятностных характеристик нестационарных случайных процессов [7-10].

Теоретически механизм обработки МСК по зависимостям (1) и (2) объясняется наличием операции усреднения некоторой ограниченной совокупности данных по мгновённым значениям контролируемого процесса. Алгоритм обработки МСК в сочетании с предварительным преобразованием с помощью оператора $g[X]$ делает процесс похожим на обычные статистические вычислительные процедуры. Однако существует принципиальное отличие, процедура обработки МСК обязательно включает сравнение с пороговым значением, обеспечивая единство контроля и установленную точность. Таким образом, можно выделить три необходимых этапа МСК:

- преобразование исходного процесса с помощью оператора $g[X]$;
- усреднение;
- сравнение с пороговым значением.

В работе [2] была сделана попытка рассмотреть вопросы контроля вероятностных характеристик случайных процессов с учётом их особенностей и возможных принципов по

построению соответствующих МСК. Впервые обоснована 3-х уровневая система синтеза алгоритма проектирования МСК с учётом конечного дискретного множества альтернативных вариантов, сформированных по результатам их испытаний на функционально-структурных моделях. Отличительной чертой алгоритма является то, что на определённом этапе процесс делится на синтез программный и аппаратный, что позволяет алгоритму придать свойство адаптивности [2].

Таким образом, вышесказанное приводит к необходимости построения стройной теории для обработки МСК большого объёма фактических данных контроля. Требуется хорошо развитая база аппаратного анализа данных контроля МСК, сводящаяся по существу к получению их вероятностных характеристик. Наиболее проблемными являются нестационарные данные МСК, так как появляются дополнительные составляющие метрологической погрешности, усложняется проблема метрологического обеспечения, более жесткие требования предъявляются к техническим средствам. Однако на практике мы всегда имеем дело с нестационарными данными в МСК.

Основная часть

При обосновании и разработке схемы МСК возникает необходимость подбора её схем и параметров, отвечающих требованиям контроля конкретного объекта. Нахождение схем и параметров МСК, удовлетворяющих заданным условиям, составляет задачу её синтеза. В отличие от задачи анализа, при котором схема и параметры МСК однозначны и известны, задача синтеза может иметь несколько решений (или вовсе не иметь конкретного решения). Наличие нескольких решений приводит к необходимости сопоставления полученных вариантов МСК и выбора оптимального (приемлемого).

Используя современный научный подход, изложенный в теоретической работе [9], построим теорию для обработки МСК большого объёма фактических данных контроля.

Взаимодействие каналов в МСК может осуществляться различными способами. Рассмотрим построение МСК, когда процесс взаимодействия между каналами осуществляется последовательными приближениями (итерациями), описываемыми рекуррентными соотношениями вида

$$y_i(t) = y_{i-1}(t) + \Delta y_i(t), \quad (3)$$

где

$$\Delta y_i(t) = \int_{t_0}^t W_i(t-\tau) \varepsilon_{i-1}(\tau) d\tau \quad (4)$$

- поправка, вносимая i -м каналом МСК в контролируемый параметр $y_{i-1}(t)$ с помощью i -го канала МСК.

Следовательно, на i -ый канал МСК с весовой функцией $W_i(t)$ уже подаётся ошибка $\varepsilon_{i-1}(t)$ контролируемого параметра $x(t)$ с помощью $i-1$ канала МСК:

$$\varepsilon_{i-1}(t) = x(t) - y_{i-1}(t). \quad (5)$$

Рассмотрим задачу синтеза МСК, реализующего итерационный алгоритм последовательного приближения [2] при наличии помех рис.3. Построим МСК таким образом, чтобы при наличии помех ошибка стремилась к нулю рис.4.

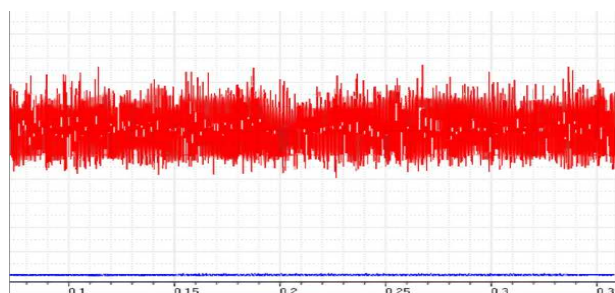


Рисунок 3 – Диаграмма вибросигнала редуктора R-55 станка-качалки типа UP-12Т скважины №40Д НГПУ «Долинанефтегаз» на входе цифрового канала контроля МСК

Поскольку многоканальный контроль выполняется последовательно во времени, то контрольный цикл можно представить как выборку из реализации некоторого случайного процесса $x(t)$. Как правило, функция $x(t)$ имеет ограниченный по частоте спектр, то при растяжении графика во времени наступает момент, когда он начинает выглядеть не как шум (рис.3), а как извилистая кривая (рис.4). При достаточно малом сдвиге по времени наступает момент τ когда значения функции на рис.4 будут различаться слабо (при нулевом сдвиге не будут отличаться совсем), а на рис.3 будут отличаться существенно даже при как угодно малом τ . Количественно эти свойства случайных функций описываются известной функцией автокорреляции.

В нашем примере на рис. 4 - коррелированный случайный процесс, а на рис.3 – некоррелированный случайный процесс (белый шум).

Если интервал корреляции равен нулю, то случайный процесс в МСК считают некоррелированным или белым шумом. В противном случае процесс считается коррелированным. Реальные процессы контроля являются коррелированными, поскольку имеют ограниченную мощность и, следовательно ограниченную полосу частот. Однако для удобства обработки в МСК на определенном

интервале времени (частот) процессы контроля можно приближенно считать некоррелированными.

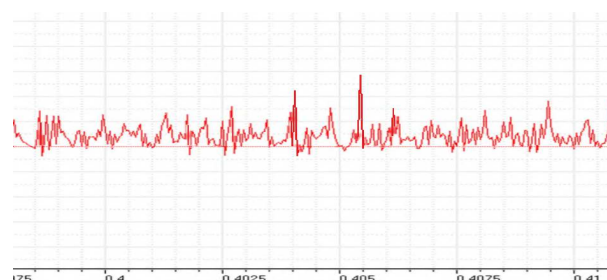


Рисунок 4 – Диаграмма вибросигнала редуктора R-55 станка-качалки типа UP-12Т скважины №40Д НГПУ «Долинанефтегаз» на выходе цифрового канала контроля МСК после обработки

Требование статистической независимости контрольных измерений МСК не выполняется, когда действует искусственная помеха, делающая шум некоррелированным (цветным), например помеха сотового передатчика на крыше здания, от радиотелефона, из сети 50 Гц, от сварочного аппарата и т.д. Особенно это характерно и присутствует в полной мере на нефтепромыслах (рис.2.)

Всё это укладывается в современную теорию вероятностей и математической статистики [6].

Синтез МСК, реализующий итерационный алгоритм последовательного приближения и компенсацию помехи изложен в работе [11]. Ошибка акселерометра МСК реально уменьшена с 38,2% до менее 5% (подтверждено экспериментом). При этом МСК становится гибкой и с переменными параметрами, чего не было у предшественников.

Обозначим выходную переменную i -го канала МСК при отсутствии помех через y_i^* , помехи связанные с i -каналом МСК - через $F_i(t)$, линейный оператор последовательного приближения i -го канала МСК через $R_i(p)$, где p - оператор дифференцирования.

Задаче синтеза МСК поставленной так, чтобы ошибка МСК с увеличением числа каналов стремилась к нулю, соответствует рекуррентные соотношения.

$$\begin{aligned} y_1(t) &= y_1^*(t) + F_1(t), \\ y_2(t) &= y_1(t) + y_2^*(t) + F_2(t), \\ &\vdots \\ y_n(t) &= y_{n-1}(t) + y_n^*(t) + F_n(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} y_1^*(t) &= R_1(p)[x_1(t) - y_1(t)]; \\ y_2^*(t) &= R_2(p)[x_2(t) - y_2(t)] \\ &\vdots \\ y_n^*(t) &= R_n(p)[x_n(t) - y_n(t)]. \end{aligned}$$

Из рекуррентного соотношения (4) получаем соотношения

$$\begin{aligned} y_1(t) &= W_1(p)x_1(t) + E_1(p)F_1(t), \\ y_2(t) &= W_1(p)E_2(p)x_1(t) + W_2(p)x_2(t) + \\ &+ E_1(p)E_2(p)F_1(t) + E_2(p)F_2(t), \\ &\vdots \\ y_n(t) &= W_1(p)\prod_{i=2}^n E_i(p)x_1(t) + W_2(p)\prod_{i=3}^n E_i(p)x_2(t) + \dots + \\ &+ W_{n-1}(p)E_n(p)x_{n-1}(t) + W_n(p)x_n(t) + \dots + \prod_{i=1}^n E_i(p)F_1(t) + \\ &+ \prod_{i=2}^n E_i(p)F_2(t) + \dots + E_{n-1}(p)F_{n-1}(t) + E_n(p)F_n(t), \end{aligned} \quad (7)$$

где $W_i(p) = R_i(p)[1 + R_i(p)]^{-1}$,

$$E_i(p) = [1 + R_i(p)]^{-1}.$$

Таким образом, переходя к матричной форме и полагая в соотношениях (7) $x(t) = \vec{0}$, получаем

$$\vec{y}(t) = \Psi(p)\vec{F}(t), \quad (8)$$

где

$$\Psi = \begin{pmatrix} E_1 & 0 & \dots & 0 \\ E_1 E_2 & E_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \prod_{i=1}^n E_i & \prod_{i=2}^n E_i & \dots & E_n \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что компенсация помех в МСК, реализующего итерационный алгоритм последовательных приближений потенциально будет очень высокой. Это объясняется тем, что при выполнении алгоритма (9) динамические свойства каждого канала МСК используются в полном объеме. При этом ошибка компенсации n -канальной МСК оценивается зависимостью

$$\varepsilon_i(t) = \prod_{i=1}^n E_i(p)F_1(t). \quad (10)$$

И хотя проведенные моделирование и анализ не учитывают многих деталей, идеализируют процесс, тем не менее,

вышесказанное позволяет выявить одно из направлений синтеза МСК и поясняет природу явления компенсации помех в них.

В нашей практике и практике других исследователей показано, что очень редко удается снизить общую погрешность более чем в 2-3 раза с помощью усреднения.

Рассмотрим случай компенсации МСК одной помехи $F_1(t)$. В этом случае задача синтеза МСК может быть существенно упрощена. Используя соотношения и формулы (3-8), итерационный алгоритм (9) можно реализовать формулой

$$y_i(t) = y_{i-1}(t) + \int_{t_0}^t W_i(t-\tau)[x(\tau) - y(\tau)]d\tau,$$

где нулевое приближение $y_0(t)$ равно $F_1(t)$.

Рассмотрим синтез обработки в многоканальной МСК, работающей по принципу грубого и точного приближения.

В этом случае результаты измерений МСК должны быть независимы, то есть интервал времени между соседними контрольными измерениями МСК должен быть много больше времени автокорреляции случайной погрешности МСК. Но как приведено в работе [11], усреднение даже 100 измерений в течение 10 с не может скомпенсировать компоненты шума, спектр которых лежит ниже 0,1 Гц.

Например, необходимо оценить процесс $\bar{x}(t)$, который контролируется МСК с помехой $f(t)$, имеющей нулевое математическое ожидание. Предположим, что функция процесса может быть представлена в виде степенного полинома по времени t

$$x(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i.$$

Тогда первое приближение в МСК оценивается зависимостью с помощью грубого оператора

$$\hat{x}_1 = W(D)x(t) = W(D)x(t) + W(D)f(t),$$

где D - дисперсия оценки.

Грубый оператор дает несмещенную оценку величины a_0 .

Ошибку грубого оператора уменьшаем с помощью второго точного оператора МСК

$$\varepsilon_1(t) = x(t) - \hat{x}_1(t) = [1 - W_1(D)]x(t) + W_1 f(t)$$

Например, если контролируемый процесс представить зависимостью $\bar{x}(t) = a_0 + a_1 t$, то несмещенная оценка в МСК может быть получена с помощью точного оператора, преобразующего ошибку первого приближения

$$\hat{x}_2(t) = W(1 + E)x(t) = [1 - E^2(D)]x(t).$$

При условии $t \rightarrow \infty$ и что оба канала МСК обладают астатизмом первого порядка, справедлива гипотеза

$$\hat{x}_2(t) \cong a_0 + a_1 t + (1 - E^2) f(t).$$

Следовательно, ошибка МСК в этом случае

$$\varepsilon_2(t) = E^2(D)f(t).$$

Очевидно, что этот принцип итерационного уточнения в каналах МСК может быть продолжен до соответствия требуемой ошибке контроля.

Использование этого принципа итерационного уточнения в каналах МСК может существенно расширить и повысить эффективность контроля без изменения схемы аппаратуры.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований решена важная научно-прикладная задача разработка теории обработки многоканальными мобильными системами контроля большого объема фактических данных. При этом получены такие основные результаты:

1. Проведено исследование четырех основных методов измерения дисперсии: компенсационного, со сравнением, модуляционного и корреляционного. Показаны их достоинства и недостатки.

2. Разрешающая способность МСК не зависит от величины систематической погрешности и поэтому может быть увеличена существенно в отличие от погрешности. Она может стать даже меньше величины младшего значащего разряда АЦП при условии, если стабильность его уровней позволяет это сделать.

3. Для некоррелированной погрешности МСК при изменении масштаба по оси времени внешний вид графика остается прежним, уменьшается только среднеквадратическое значение шума вследствие уменьшения ширины временного окна наблюдения.

4. Когда действует искусственная помеха, делающая шум некоррелированным (цветным), требование статистической независимости контрольных измерений МСК не выполняется.

5. Выполнение алгоритма (9) позволяет получать несмещенные оценки контролируемых процессов при требуемой фильтрации помехи в МСК.

6. Рассмотрен синтез обработки в многоканальной МСК, работающей по принципу грубого и точного приближения.

7. Выражение (9) показывает, что компенсация помех в МСК, реализующего итерационный алгоритм последовательных приближений потенциально будет очень высокой. Это объясняется тем, что при выполнении алгоритма (9) динамические свойства каждого канала МСК используются в полном объеме.

8. Использование принципа итерационного уточнения в каналах МСК может существенно расширить и повысить эффективность контроля без изменения схемы аппаратуры.

Література

1. ДСТУ 2681-94 (ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.)

2. Лопатін В.В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів. Автореферат дис. докт. техн. наук: 05.11.13. / В.В. Лопатін. - Івано-Франківськ 2013. - 34 с.

3. РМГ 29-99 ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

4. Ильин С.Р. Программно-аппаратный комплекс для испытания образцов горных пород / С.Р. Ильин, В.В. Лопатин, Б.С. Послед // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / НАН Украины ИГТМ. - Днепропетровск, - 2002. - Вып.38 - С. 188-191.

5. Куликов Е.И. Методы измерения случайных процессов / Е.И. Куликов - М.: Радио и связь, 1986. - 272 с.

6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. - М.: Высшая школа, 2001. - 479 с

7. Эльясенберг П.Е. Определение движения по результатам измерений / П.Е. Эльясенберг. - М. ЛИБРОКОМ, 2011. - 510 с.

8. Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. - 2nd. nd. New York: McGraw-Hill, Inc. 1984. - 357 p.

9. Thomas J. An Introduction to Statistical Communication Theory. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2001. - 426 p.

10. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко // М.: Горячая линия - Телеком, 2009. - 608 с.

11. Лопатін В.В. Дослідження експериментальні мобільної системи контролю вібрації свердловинної штангової насосної установки / В.В. Лопатін // Методи та прилади контролю якості. Науково технічний журнал - Івано-Франківськ. - № 1(30), 2013, с. 8-15.

Поступила в редакцію 18.06.2016 р.

Рекомендували до друку:
докт. техн. наук, проф. Копей Б. В.,
докт. техн. наук, проф. Юрчишин В. М.