

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСШИХ ПРОИЗВОДНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

к.т.н. С.В. Чёрный, В.А. Жилин
(представил д.т.н., проф. О.Н. Фоменко)

Приводятся экспериментальные частотные характеристики измерителя высших производных линейных ускорений, разработанного авторами на основе серийного акселерометра БДЛУ-1. Доказана возможность технической реализации измерителей высших производных физических величин на основе серийных компенсационных измерителей.

Приведенные ниже данные представляют пример экспериментального исследования измерителя высших производных линейных ускорений, выполненного в соответствии с методом интегральной компенсации [1]. Этот метод дает возможность превратить любой компенсационный измеритель в датчик производных высокого порядка (ДПВП), обеспечивающий [2,3]: повышение точности измерения входного сигнала; увеличение количества измеряемых производных входного сигнала.

Возможность повышения точности измерения физических величин нелинейными устройствами сравнения достигается введением в контур измерителя интегрирующих звеньев в соответствии со структурой ДПВП (рис.1). Это приводит к появлению эффекта внутренней вибрационной линеаризации существенных нелинейностей измерителя.

Для некоторых типов измерителей физических величин с механическими чувствительными элементами (ЧЭ) характерны ненулевые моменты сухого трения в опорах ЧЭ. К таким измерителям, в частности, относятся компенсационные гироскопические измерители угловых параметров движения (ГИУПД) и компенсационные акселерометры, широко используемые в системах управления летательных аппаратов (ЛА). Сухое трение в опорах приводит к появлению нелинейности в виде зоны нечувствительности и обусловленной ею погрешности измерения, которая увеличивается при использовании измерителя на подвижном основании (ЛА).

В [2, 3] предлагается новый подход к решению задачи снижения влияния зоны нечувствительности, основанный на эффекте ее внутренней вибрационной линеаризации за счет “оживления” ЧЭ измерителя. Суть такого “оживления” состоит в обеспечении автоколебательного движения (скользящий режим) ЧЭ относительно среднего уровня изме-

ряемого сигнала. При этом амплитуда автоколебаний ЧЭ больше величины порога чувствительности, что обеспечивает наблюдение измеряемого сигнала даже в пределах конструктивно присущей измерителю зоны нечувствительности. В то же время амплитуда автоколебаний на измерительном выходе существенно ниже порога чувствительности благодаря фильтрации автоколебаний в линейной части специального вида.

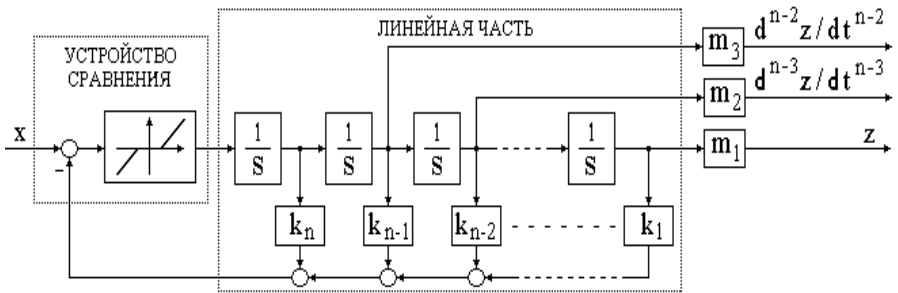


Рис. 1. Структурная схема ДПВП с нелинейным устройством сравнения

Такую линейную часть предлагается строить с использованием структуры ДПВП, поскольку помимо устойчивых автоколебаний это обеспечивает возможность выделения производных от измеряемой величины по времени.

Указанные свойства измерителя наблюдаются, в частности, если коэффициенты обратной связи выбирать следующим образом [1]:

$$k_{n-i+1} = C_n^i \omega_0^i; \quad C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad (1)$$

где ω_0 - собственная частота измерителя; n - порядок измерителя (количество интегрирующих звеньев в структуре); C_n^i - полиномиальные коэффициенты бинома Ньютона, причем $i = \overline{1, n}$.

Усилительные звенья с коэффициентами усиления m_j могут быть введены на измерительных выходах (рис.1) для воспроизведения измеряемых производных в необходимом масштабе.

В [3] подробно рассмотрено то обстоятельство, что выбор коэффициентов обратной связи в соответствии с (1) обеспечивает минимизацию фазовой ошибки формирования производных при технических ограничениях на реализацию $k_1, k_{n-1}, k_{n-2}, \dots, k_n$.

Экспериментальный образец измерителя изготовлен на основе серийного акселерометра БДЛУ-1 (блока датчика линейных ускорений). Данный акселерометр предназначен для измерения линейного ускорения, действующего вдоль оси чувствительности Ox , и выдачи электри-

ческого сигнала, величина которого пропорциональна измеряемому ускорению (рис.2).

Основные технические данные БДЛУ-1 приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Основные технические характеристики блока БДЛУ-1

Параметры	Паспортные значения
Источник питания	однофазный, $36_{-3,6}^{+1,8}$ В, 400 ± 20 Гц
Время готовности	≤ 10 с
Диапазон измерения	$\pm 10g$
Порог чувствительности	$\leq 0,1\%$ от диапазона измерения
Максимальный выходной сигнал	$10 \pm 0,02$ В
Масса	$\leq 0,76$ кг

Измеритель работает так. При воздействии составляющей a_{ξ} линейного ускорения, направленной по оси чувствительности Ox датчика ДЛУВЧ-2, возникает инерционный момент, отклоняющий маятник от положения равновесия относительно измерительной оси $O\xi$ на угол α . Отклонение маятника преобразуется датчиком угла ДУ в электрический сигнал. Сигнал с датчика угла поступает на вход амплитудного фазочувствительного детектора-усилителя БУ-44-2-11, преобразуется в напряжение постоянного тока и через усилитель УПТ-2-У2 подается в блок интеграторов, который структурно представляет собой линейную часть ДПВП (рис.1), дополнительно введенную авторами в схему БДЛУ-1. С выхода последнего интегратора блока интеграторов сигнал, пропорциональный a_{ξ} , подается на датчик момента ДМ, создающий момент, пропорциональный моменту инерционных сил, действующих на маятник.

Под действием инерционного момента подвижная часть стремится отклониться от среднего положения (когда оси $O\xi$ и Ox совпадают).

В серийных акселерометрах при достижении равенства инерционного момента и момента "электрической пружины" (без блока интеграторов) отклонение подвижной части прекращается. При этом ток в катушке моментного датчика ДМ прямо пропорционален составляющей a_{ξ} действующего линейного ускорения (перегрузки). Этому препятствует противодействующий момент "электрической пружины" (ДУ — БУ-44-2-11 — УПТ-2-У2 — блок интеграторов — ДМ), который возрастает пропорционально протекающему через нее току. Напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемое с резистора нагрузки R , пропорционально величине a_{ξ} [4].

В предлагаемом измерителе при первом (с начала измерения) пре-

вышении момента инерции от входного сигнала a_ξ над величиной момента трения, обуславливающего величину Δ_0 порога чувствительности, происходит возбуждение автоколебаний тока, протекающего в "электрической пружине" [2]. При этом под воздействием ДМ маятник совершает незатухающие колебания относительно текущего положения отклонения на угол α , пропорциональный текущему значению a_ξ .

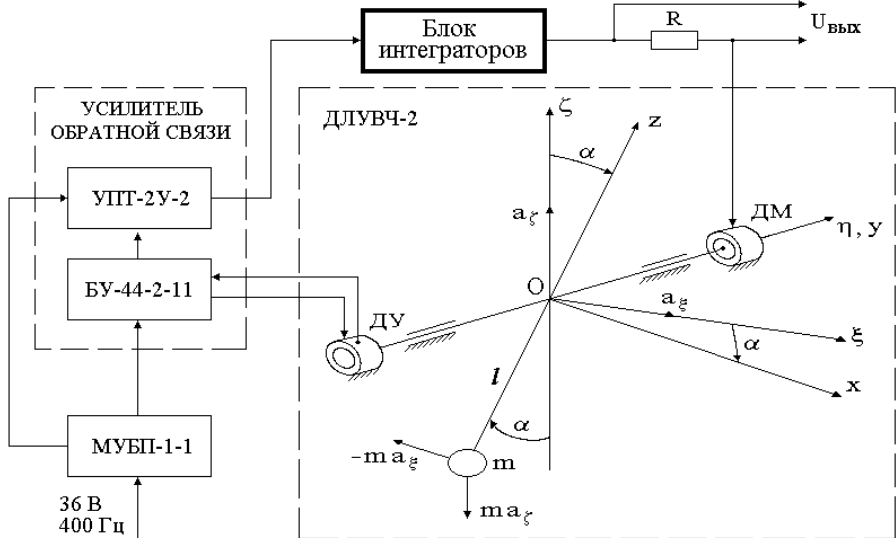


Рис. 2. Электромеханическая схема измерителя высших производных линейных ускорений

Амплитуда колебаний маятника относительно отклонения на угол α существенно больше Δ_0 , поэтому отслеживать величину a_ξ возможно даже в пределах зоны нечувствительности, когда $a_\xi \in [-\Delta_0; +\Delta_0]$.

Вместе с тем, амплитуда автоколебаний A_n на выходе последнего интегратора существенно ниже величины Δ_0 . Эффект снижения A_n при прохождении сигнала через блок интеграторов объясняется тем, что его структура и выбор коэффициентов обратной связи по (1) обеспечивают величину частоты автоколебаний $\omega_n > 1$ рад/с, даже при очень малой величине ω_0 [2].

Применение блока интеграторов обеспечивает трансформирование погрешности измерения от влияния зоны нечувствительности в менее существенную погрешность от влияния автоколебаний. Данное свойство экспериментального измерителя подтверждает эмпирическое аналитическое соотношение для величины амплитуды автоколебаний на выходе последнего интегратора [2]:

$$A_n = \frac{0,85}{(n-2)!} \Delta_0. \quad (2)$$

Соотношение (2) указывает на тот факт, что амплитуда автоколебаний на выходе последнего интегратора может быть существенно ниже величины порога чувствительности.

Электрическая принципиальная схема блока интеграторов приведена на рис. 3. Входным сигналом для первого интегратора является сигнал с выхода усилителя обратной связи БДЛУ-1. Выходной сигнал блока интеграторов является входным для ДМ БДЛУ-1.

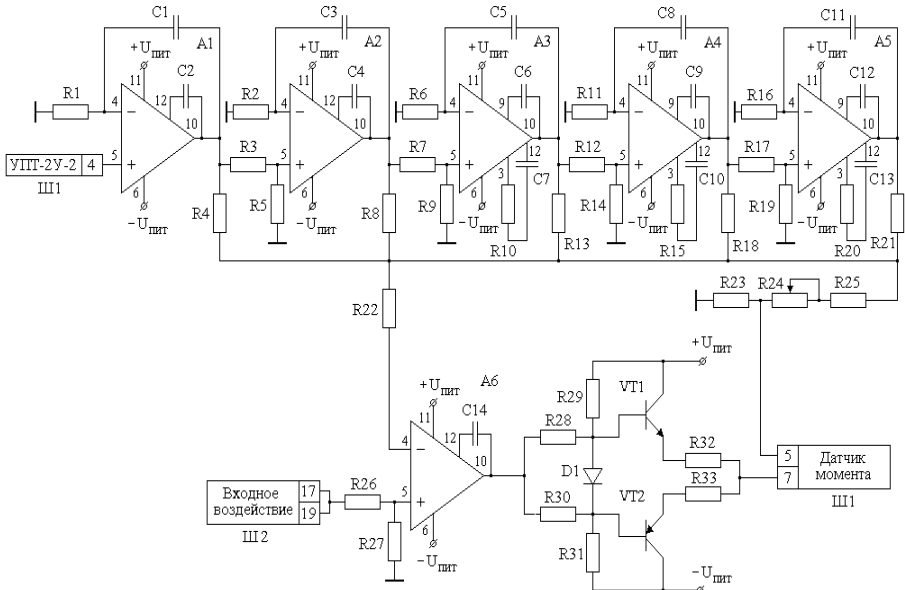


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная блока интеграторов

Обозначение Ш1 относится к разъему 2РМД24КПН10Ш5А1 БДЛУ-1, соединяющему БДЛУ-1 с блоком интеграторов. Обозначение Ш2 относится к разъему блока интеграторов, который обеспечивает питанием все устройство, а также позволяет включать входное воздействие и снимать сигналы измеренных производных линейного ускорения.

В связи с отсутствием метрологически аттестованного оборудования, воспроизводящего сигналы высших производных линейного ускорения в лабораторных условиях, входное воздействие в виде напряжения подавалось через сумматор А6 на двухтактный усилитель мощности, собранный на транзисторах VT1, VT2, и далее — на датчик момента БДЛУ-1. Таким образом, за счет принудительного отклонения ЧЭ

(маятника) имитировалось входное воздействие составляющей a_x линейного ускорения объекта относительно оси чувствительности Ox датчика ДЛУВЧ-2 БДЛУ-1. Указанный подход к тестированию предложенного измерителя не противоречит традиционным приемам, поскольку, именно таким образом, организована проверка датчиков компенсационного типа на этапе контроля систем ЛА [5].

Целью проведенных исследований являлось:

- изучение статической и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) экспериментального образца предлагаемых измерителей;
- доказательство практической осуществимости устойчивых схем измерителей высших производных физических величин на основе серийных компенсационных измерителей.

На рис. 4,а приведены АЧХ для выходов измеряемой величины (после интегратора А5) и выхода первой производной (после интегратора А4), полученные при воздействии на вход измерителя напряжения $U_{\text{ш2}} = U_{\text{вх}} \sin(2\pi f_{\text{вх}} t)$ при различных значениях $U_{\text{вх}}$.

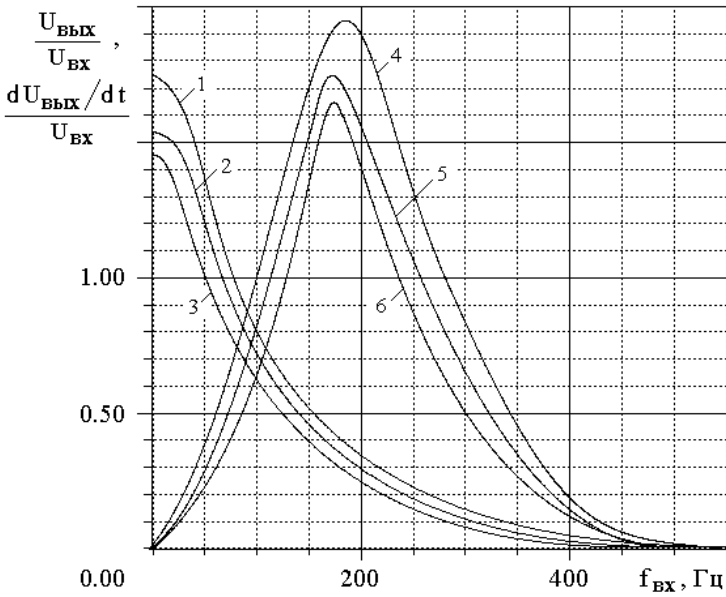
На рис.4, 5 приведены АЧХ для выходов 1 – 5 - й производных измеряемой величины. Из полученных АЧХ видно, что коэффициент передачи тем выше, чем выше порядок измеряемой производной. Таким образом, экспериментально подтверждены выводы, теоретически обоснованные в [3].

А именно, структурно - параметрическая оптимизация измерителя по критерию минимума погрешности [2,3] возможна либо относительно самой измеряемой величины, либо относительно какой-то одной ее производной. Чем выше порядок производной, которую нужно получить с минимальной погрешностью, тем более высоким должен быть порядок измерителя. В этом случае, силу нарастания динамической составляющей погрешности при высоких частотах измеряемой величины [1], необходимо располагать современной элементной базой для технической реализации высокой собственной частоты измерителя, т.е. достаточной величины максимального коэффициента усиления k_1 .

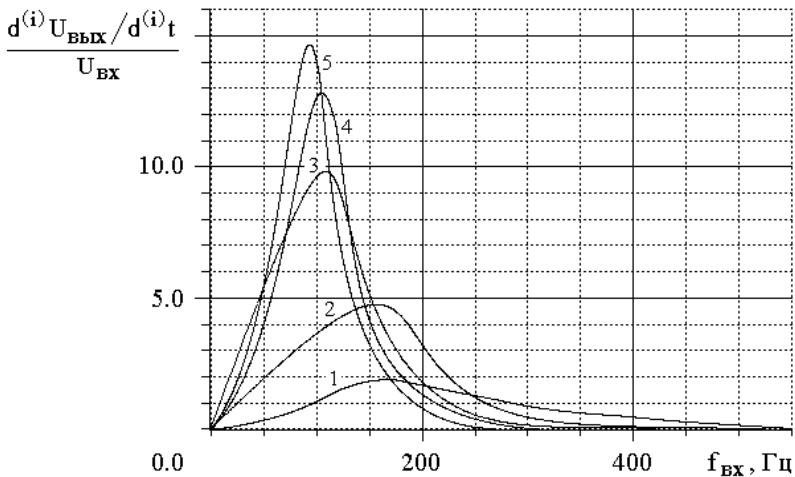
На рис. 5 приведены точки экспериментально полученных значений статической характеристики и ее аппроксимация сплайнами. Несмотря на нелинейность статической характеристики вблизи начала координат, она не имеет зоны нечувствительности.

Таким образом, экспериментально доказана возможность трансформирования погрешности измерения от влияния зоны нечувствительности в погрешность от влияния автоколебаний благодаря использованию предложенной структуры измерителя.

Определенную составляющую погрешности вносит и смещение нуля измерителя, также наблюдаемое на рис. 5.



а)



б)

Рис. 4. Экспериментальные АЧХ:

- а) для выходов измеряемой величины (1, 2, 3) и первой производной (4, 5, 6) при $U_{ВХ} = 0,5В$ (1, 4), $U_{ВХ} = 1В$ (2, 5), $U_{ВХ} = 2В$ (3, 6);
 б) для выходов производных при $U_{ВХ} = 1В$, $i = 1$ (1), $i = 2$ (2), $i = 3$ (3), $i = 4$ (4), $i = 5$ (5)

Тем не менее, можно показать, что уменьшилась аддитивная составляющая погрешности, которая для акселерометров соответствует погрешности от зоны нечувствительности. На основании данных табл. 1 можно в первом приближении оценить значение порога чувствительности БДЛУ-1 как $\Delta_0 \leq 0,01\text{В}$ напряжения на обмотках ДМ "электрической пружины", которое соответствует входному сигналу линейного ускорения $a_g \leq 0,01g$.

В исследуемом экспериментальном образце усилители А1, А2, А6 блока интеграторов реализованы на микросхемах К553УД2, усилители А3, А4, А5 — на микросхемах К553УД1. Следовательно, питание блока интеграторов, в принципе, может осуществляться напряжением постоянного тока $\pm 8,1 \dots \pm 18\text{В}$ со средней точкой. В рассматриваемом эксперименте использовалось напряжение $\pm 15\text{В}$.

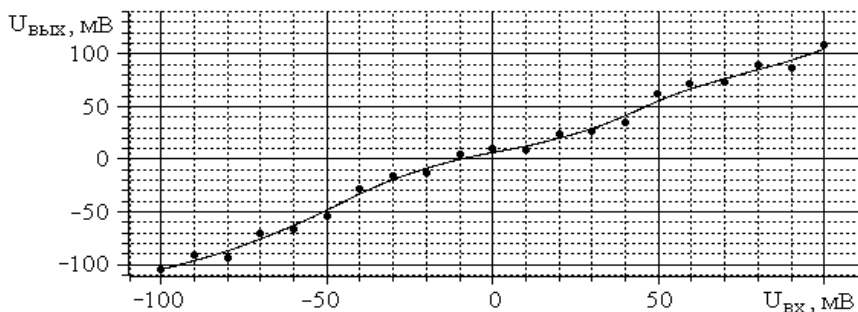


Рис. 5. Экспериментальная статическая характеристика измерителя высших производных линейного ускорения

Значит максимальный выходной сигнал в первом приближении не превышает 15В. Тогда, если бы порог чувствительности экспериментального образца измерителя был бы равен порогу чувствительности БДЛУ-1 $\Delta_0 \leq 0,01\text{В}$, то минимальная погрешность от его влияния соответствовала бы величине $\Delta_{0g} \leq 0,015\text{В}$.

Однако, как видно из полученной статической характеристики, аддитивная составляющая погрешности от влияния автоколебаний даже в сумме с погрешностью от смещения нуля в среднем в 2,5 раза меньше, чем 0,015В. А значит, погрешность от влияния автоколебаний в экспериментальном образце измерителя меньше по величине, чем погрешность от влияния зоны нечувствительности серийного прототипа — БДЛУ-1.

Таким образом, проведенное исследование доказывает возможность улучшения метрологических характеристик серийных компенсационных измерителей физических величин и практическую возмож-

ность внутренней вибрационной линеаризации зоны нечувствительности.

При этом за счет более глубокой и более точной компенсации действующей на ЧЭ физической величины появляется возможность расширения диапазона измерения серийных компенсационных измерителей без доработки их устройств сравнения.

Результаты экспериментального исследования измерителя высших производных линейных ускорений, построенного на основе серийного акселерометра БДЛДУ-1, можно сформулировать так:

- доказана возможность технической реализации устойчивых схем измерителей высших производных физических величин на основе серийных компенсационных измерителей;
- экспериментально подтверждены положения методики синтеза измерителей высших производных с нелинейным устройством сравнения, обоснованные в работах [2,3];
- экспериментально доказана возможность повышения точности серийных компенсационных измерителей за счет внутренней вибрационной линеаризации зоны нечувствительности при использовании предложенной структуры обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чёрный С.В. Метод интегральной компенсации и измерители высших производных физических величин // Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, ХВУ. – 1998. – С. 68 - 71.
2. Чёрный С.В., Жилин В.А. Методика синтеза измерителей высших производных с нелинейным устройством сравнения // Системы обработки информации. – Харьков: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 1999. – Вип. 2(6). – С. 119 - 129.
2. Чёрный С.В., Жилин В.А. Аналитическое определение оптимальной структуры измерителей высших производных физических величин // Системы обработки информации. – Харьков: ХФВ "Транспорт України". – 2000. – Вип. 4(10). – С. 154 - 160.
3. Система автоматического управления САУ-23ПМ. Руководство по технической эксплуатации. 6А2.550.069 РЭ. Книга 3 и 4.
4. Фролов В.С. Самолетовождение с помощью приборов инерциальной навигации. – М.: Транспорт, 1975. – 184 с.

Представлено в редколлегию 19.04.2001