

УДК 538.65: 621.316.73

© С. В. Богословский, А. О. Кадкин, Г. А. Сапожников

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАССЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

Малогобаритные измерительные приборы на магнитной подвеске могут с успехом применяться для решения разнообразных технических задач, в том числе для измерения массы исследуемого вещества. Рассматриваются алгоритмы комплексирования информации, получаемой от датчиков и других элементов системы управления электромагнитного подвеса. Комплексирование, осуществляемое системой обработки информации, позволяет существенно повысить точность и достоверность измерений. Для принятия решения о целесообразности оснащения прибора встроенной системой обработки информации может быть использован предлагаемый в статье метод оценки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача комплексной инвариантной текущей оценки массы взвешенного тела (ВТ) по результатам измерения амплитуды, периода и фазы гармонических колебаний сигналов датчиков перемещения, потокосцепления и периода напряжения питания электромагнитов. Каждый датчик представляет собой нелинейную относительно фазовых координат систему с не более чем $(n - 1)$ коррелированными входами (n — порядок системы дифференциальных уравнений математической модели датчика) в форме суммы неслучайных гармонических и случайных стационарных процессов. Корреляционные функции случайных входных процессов известны.

Основные параметры гармонического сигнала каждого из датчиков являются входными сигналами соответствующего измерителя. Известными предполагаются среднеквадратические значения ошибок определения основных параметров гармонического сигнала каждого из датчиков. Погрешности определения основных параметров гармонического сигнала датчика взаимно независимы и не зависят от оцениваемой величины. При этом рассматривается случай, когда погрешности сигналов датчиков характеризуются нормальными законами распределения. На выходе всех измерителей формируется полезный сигнал об одной и той же величине, в качестве которой принимается относительное значение массы ВТ.

В качестве показателя оптимальности оценивания массы ВТ примем условный средний квадрат ошибки оценки. Требуется выполнить комплексную оптимальную оценку полезного сигнала по сигналам датчиков перемещения, потокосцепления и периода напряжения питания электромагнитов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Нелинейная математическая модель массоизмерительного прибора (МИП), использующего электромагнитный преобразователь силы на переменном токе, при изменении величины периода напряжения питания в случае однокомпонентного подвеса имеет вид в форме Коши [1, 2]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_{21} \cdot x_1 + a_{23} \cdot x_3^2 + a_{24} \cdot (T_0 + x_4)^2 + \frac{F_{\text{ВН}}}{m}, \\ \dot{x}_3 &= a_{33} \cdot x_3 + K_u \cdot u, \\ \dot{x}_4 &= u, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_1 — перемещение ВТ; x_2 — скорость перемещения ВТ; x_3 — динамическая составляющая потокосцепления; x_4 — динамическая составляющая периода напряжения питания; $m = m_0 + dm$ — масса ВТ; dm — взвешиваемая масса; m_0 — масса

контейнера; $a_{21} = -\frac{\lambda}{m}$; λ — коэффициент демп-

фирования; $a_{23} = -\frac{K_F}{m}$; $K_F = \frac{1}{2\mu_0 w^2 S}$; w — чис-

ло витков обмотки электромагнита; S — площадь полюса электромагнита; μ_0 — магнитная посто-

янная; $a_{24} = -K_F \cdot \frac{U_0^2}{m \cdot 8 \cdot \pi^2}$; U_0 — амплитуда на-

пряжения питания; $a_{33} = -K$; $K = R / L$; R, L — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения электромагнитов; $K_u = -\beta$;

$\beta = \frac{U_0 \cdot \sin(\gamma - \varphi)}{2 \cdot \pi}$; $\varphi = \arctg \frac{2 \cdot \pi}{T_0 \cdot K}$; $\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{T_0} \cdot t_0$;

t_0 — момент начала изменения периода; T_0 — начальное значение периода; $F_{\text{ВН}}$ — внешняя сила,

приложенная к ВТ; u — сигнал управления, зависящий от фазовых координат и от задающего воздействия.

Для получения достаточно простых аналитических зависимостей целесообразно получить упрощенную линейную модель переходных процессов. При этом вид линеаризованной модели, достаточно точно отражающей характер автоколебательных процессов в системе (1), существенно зависит от задающего воздействия, в качестве которого можно выбрать начальное условие по четвертой координате, дополнительное воздействие по ускорению и гармоническое воздействие по управляющему сигналу. В зависимости от вида задающего воздействия ниже рассматриваются соответствующие линеаризованные модели.

1. Для исследования переходных процессов по возмущению в виде начального условия по четвертой координате линеаризуем квадратичные нелинейности, входящие во второе уравнение системы (1), разлагая их в ряд Тейлора по периоду напряжения питания в окрестности равновесного значения T_0 . В результате получим линеаризованную систему уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_{24} \cdot 2 \cdot T_0 \cdot x_4, \\ \dot{x}_3 &= a_{33} \cdot x_3 + K_u \cdot u, \\ \dot{x}_4 &= u, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u = K_1 \cdot x_1 + K_2 \cdot x_2 + K_4 \cdot x_4$; K_1 , K_2 и K_4 — коэффициенты пропорциональности.

2. В случае, когда автоколебания возбуждаются под действием возмущения по ускорению $\frac{\Delta F_{\text{ВН}}}{m}$, создаваемого скачком внешней силы $\Delta F_{\text{ВН}}$, второе уравнение системы (1) необходимо линеаризовать по периоду напряжения питания в окрестности $T = T_0$.

Из условия равновесия $\dot{x}_2 = 0$ получим $T_0 = \sqrt{-\frac{F_0}{a_{24} \cdot m}}$, где T_0 — равновесное значение периода напряжения питания при номинальном значении силы; $F_0 = 9.81 \cdot m_0$ — равновесное значение внешней силы, соответствующее массе m_0 .

Разлагая правую часть второго уравнения системы уравнений (1) в ряд Маклорена по фазовой координате x_4 (в окрестности точки $x_4 = 0$), получаем модель, у которой коэффициент второго уравнения при фазовой координате x_4 зависит от равновесного значения внешнего воздействия F_0 и от амплитуды скачка по силовому воздействию $\Delta F_{\text{ВН}}$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_{24} \cdot 2 \cdot (T_0 + \Delta T_0) \cdot x_4 + \frac{\Delta F_{\text{ВН}}}{m}, \\ \dot{x}_4 &= u, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta T_0 = \sqrt{-\frac{\Delta F_{\text{ВН}} \cdot m_0}{a_{24} \cdot m}}$, ΔT_0 — приращение начального значения периода, $\Delta F_{\text{ВН}} = F_{\text{ВН}} - F_0$ — приращение внешней силы.

3. При возбуждении автоколебаний гармоническим возмущением сигнала управления нетривиальной линеаризации необходимо подвергнуть как квадратичную нелинейность по четвертой фазовой координате, так и квадратичную нелинейность по третьей фазовой координате.

Линеаризацию проведем в окрестности точки $(x_4 = 0, x_3 = F_{z \text{ max}})$, где $F_{z \text{ max}} = K_u \cdot K_4 \cdot A_z \cdot T_0 / (2\pi)$ — амплитуда реакции третьей фазовой координаты на гармоническое воздействие. В результате получим линеаризованную модель с коэффициентами, зависящими от амплитуды возмущающего гармонического воздействия и равновесного значения периода напряжения питания при возмущающем воздействии по ускорению

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= a_{23} \cdot K_{23} \cdot 2T_0 \cdot x_3 + a_{24} \cdot 2T_0 \cdot x_4, \\ \dot{x}_3 &= a_{33} \cdot x_3 + K_u \cdot u, \\ \dot{x}_4 &= u, \end{aligned} \quad (4)$$

где $u = K_1 \cdot x_1 + K_2 \cdot x_2 - K_4 \cdot x_{42} + A_z \cdot \sin(2\pi f_z)$; A_z, f_z — амплитуда и частота задающего воздействия; коэффициент K_{23} определяется амплитудой реакции третьей фазовой координаты на гармоническое воздействие $K_{23} = K_u \cdot K_4 \cdot A_z / (2\pi)$.

При этом исследование вынужденных колебаний под действием гармонического задающего сигнала и при значениях коэффициентов K_1 и K_2 , соответствующих состоянию системы с большим запасом устойчивости, целесообразно проводить с использованием модели (2), а модель (4) предназначена для исследования колебательных процессов, возникающих в системе (1) под действием гармонического задающего сигнала и при значениях коэффициентов K_1 и K_2 , соответствующих состоянию системы на границе устойчивости.

Сравнительное исследование переходных процессов в исходной нелинейной системе (1) и в линеаризованных системах (2)–(4) показало их хорошее совпадение.

МЕТОДЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Для повышения точности и достоверности обработки полезных сигналов могут быть использованы сигналы трех датчиков: датчика перемещения (координата x_1), датчика потокосцепления (координата x_3) и датчика периода напряжения питания (координата x_4), а также аналитические градуировочные зависимости массы от амплитуды, периода и фазы соответствующих сигналов.

Математическая модель измерения массы по параметрам гармонического сигнала j -го датчика может быть представлена в виде линейной динамической системы с постоянными параметрами, на вход которой в общем случае поступают текущие значения трех характеристик (амплитуды, периода, фазового сдвига) выходного сигнала датчика, в результате обработки которых формируются три стационарных случайных процесса $S_{A_j}, S_{T_j}, S_{\alpha_j}(\tau)$, несущих информацию об измеряемой массе. Номер датчика, соответствующий номеру координаты ($j = 1, 3, 4$) в математической модели (1), указывается в индексе непосредственно после буквы, обозначающей основной параметр выходного сигнала.

В зависимости от требуемой точности выбирается режим проведения эксперимента: измерения в режиме собственных колебаний (режим 1), измерения в режиме вынужденных колебаний (режим 2), измерения резонансной частоты и амплитуды в режиме вынужденных колебаний (режим 3). Учитывая, что каждый из рассмотренных режимов имеет примерно одинаковую точность, измерения могут проводиться и по программе, включающей любую комбинацию всех рассмотренных выше режимов измерений. Номер режима обозначается в индексе полезного сигнала непосредственно после номера датчика. Так, в случае измерений в режиме собственных колебаний используются градуировочные зависимости, в индексе которых вторая цифра — 1; в режиме вынужденных колебаний — 2; в резонансном режиме — 3. Например, запись $S_{A_{12}}$ означает, что масса ВТ определяется по амплитуде (буква A в индексе) сигнала датчика перемещений (этому датчику соответствует в индексе первая цифра 1) в режиме вынужденных колебаний (этому режиму соответствует в индексе вторая цифра 2).

Замеряя и обрабатывая одновременно три характеристики сигнала датчика, можно без дополнительных затрат времени за счет комплексирования информации втрое увеличить объем выборки и в несколько раз уменьшить дисперсию при измерении массы.

Дополнительные возможности представляет комплексирование результатов обработки сигна-

лов, поступающих одновременно с трех датчиков, а также комплексирование экспериментальной информации с аналитически полученными градуировочными зависимостями. В частности, градуировочные зависимости для датчика перемещения имеют вид:

— градуировочная зависимость массы ВТ от относительного значения амплитуды собственных колебаний сигнала

$$S_{A_{11}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{A=A_{11}} = \frac{a_{1A_{11}}^2 - A_{11}^2 \cdot a_{2A_{11}}}{A_{11}^2 \cdot b_{A_{11}} \cdot \sqrt{m_0}};$$

— градуировочная зависимость массы ВТ от амплитуды вынужденных колебаний сигнала

$$S_{A_{12}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{A=A_{12}} = \frac{-\frac{a_{1A_{12}}}{2 \cdot b_{A_{12}}} + \sqrt{\left(\frac{a_{1A_{12}}}{2 \cdot b_{A_{12}}}\right)^2 + \left(\frac{a_{2A_{12}}}{A_{12}}\right)^2 - a_{3A_{12}}}}{\sqrt{m_0}};$$

— градуировочная зависимость массы ВТ от периода собственных колебаний

$$S_{T_{11}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{T=T_{11}} = \left(\frac{T_{11}}{T_{110}}\right)^2;$$

— градуировочная зависимость массы ВТ от фазы собственных колебаний

$$S_{\alpha_{11}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{\alpha=\alpha_{11}} = \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_{11}}{\operatorname{tg} \alpha_{110}}\right)^2;$$

— градуировочная зависимость массы ВТ от фазы вынужденных колебаний

$$S_{\alpha_{12}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{\alpha=\alpha_{12}} = \frac{a_{1\alpha_{12}} - \operatorname{tg}(a_{2\alpha_{12}} - \alpha_{j2}) \cdot a_{3\alpha_{12}}}{[\operatorname{tg}(a_{2\alpha_{12}} - \alpha_{j2}) \cdot b_{1\alpha_{12}} - b_{2\alpha_{12}}] \sqrt{m_0}};$$

— градуировочная зависимость массы ВТ от резонансной частоты задающего воздействия

$$S_{\omega_{p12}} = \frac{m}{m_0} \Big|_{\omega_p=\omega_{p12}} = \frac{a_{\omega_{p12}}}{\left(-b_{1\omega_{p12}} + \sqrt{b_{1\omega_{p12}}^2 + 4b_{2\omega_{p12}} \cdot \omega_{p12}^2}\right) \sqrt{m_0}},$$

где a, b — коэффициенты пропорциональности числителей и знаменателей соответственно; ω_p — резонансная частота задающего воздействия; A, T, α — амплитуда, период и фаза автоколебаний (с соответствующими индексами).

Дальнейшее изложение будем вести на примере измерений в режиме собственных колебаний.

Для того чтобы воспользоваться теорией оптимальных оценок [3], хорошо разработанной для случайных величин с нормальными законами распределения, плотность распределения каждой градуировочной функции аппроксимируем плотностью распределения нормального закона так, чтобы совпадали доверительные интервалы ошибок для обеих функций распределения.

Известно, что дисперсия средневзвешенного значения меньше, чем минимальная из дисперсий усредняемых сигналов. Поэтому для повышения точности оценки в схему измерителя введем сумматоры: внешний Σ_1 и внутренние $\Sigma_{11}, \Sigma_{12}, \Sigma_{13}$ (на рис. 1 показан только первый из названных сумматоров). Стационарный случайный процесс на выходе внутреннего сумматора сформируем в виде взвешенной суммы трех выходных процессов, каждый из которых соответствует выходу одного из частных измерителей. В рассматриваемом случае оператор оптимальной оценки можно искать в классе линейных оптимально-инвариантных операторов.

При использовании комплексной безынерционной линейной обработки нормально распределенных сигналов оптимально-инвариантная несмещенная оценка $\hat{\Sigma}_j$ измеряемых параметров $A,$

T, α определяется соотношением

$$\hat{\Sigma}_j = \sum_{k=1}^3 c_{jk} \cdot y_{jk},$$

где

$$y_{j1} = \left. \frac{m(t)}{m_0} \right|_{S=S_{Aj1}}, \quad y_{j2} = \left. \frac{m(t)}{m_0} \right|_{S=S_{Tj1}}, \quad y_{j3} = \left. \frac{m(t)}{m_0} \right|_{S=S_{\alpha j1}}$$

— выходы частных измерителей j -го датчика, работающих в режиме обработки собственных гармонических колебаний (режим 1), как та часть суммарного выхода внутреннего измерителя, которая создается k входом j -го сумматора ($k = 1, 2, 3$); c_{jk} — оптимальный весовой коэффициент.

Условие несмещенности оценки средневзвешенного значения в этом случае обеспечивается

$$\sum_{k=1}^3 c_{jk} = 1.$$

При использовании комплексной безынерционной линейной обработки сигналов внешним сумматором оптимально-инвариантная несмещенная оценка выходов внутренних сумматоров может быть получена аналогично.

На рис. 1 $h_{li}(\tau)$ обозначена весовая функция подсистемы, на вход которой поступает случайный процесс $S_{li}(\tau)$ ($i = 1, 2, 3$), где $S_{11}(\tau) = S_{A11}(\tau)$, $S_{21}(\tau) = S_{T11}(\tau)$, $S_{31}(\tau) = S_{\alpha11}(\tau)$.

В этих обозначениях выходной сигнал частного измерителя $y_{li}(\tau)$ может быть представлен в виде интеграла свертки

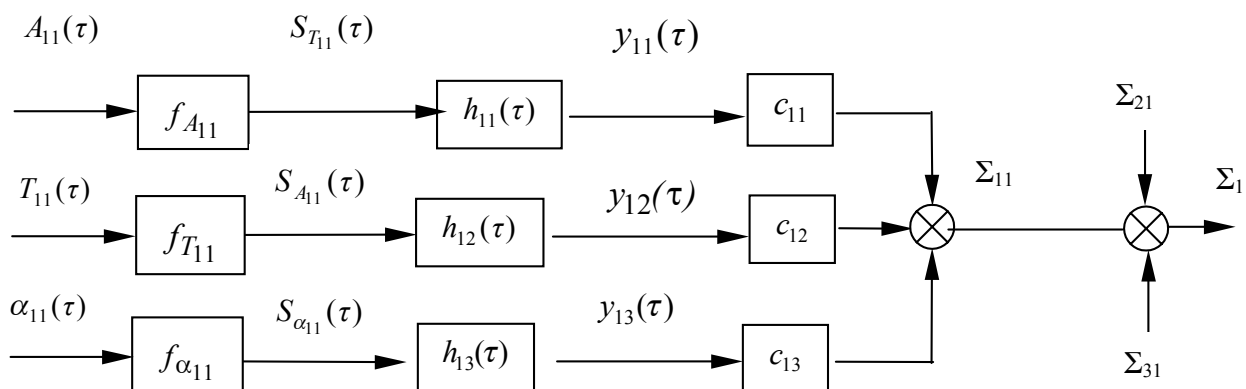


Рис. 1. Функциональная схема комплексатора трех измеряемых параметров сигнала датчика

$$y_{li} = \int_0^{\infty} h_{li}(\tau) \cdot S_{il}(t - \tau) d\tau.$$

Вообще говоря, можно было бы ограничиться получением одного измерения каждого параметра в конце интервала наблюдения. Однако с целью повышения точности и достоверности оценок целесообразно использовать не одно измерение, а всю совокупность измерений, производившихся в ходе эксперимента. Для этого и предназначена процедура обработки стационарного случайного процесса типа $S_{il}(\tau)$, позволяющая учесть информацию за весь исследуемый промежуток времени установившихся колебаний.

При использовании измерения лишь в один (конечный) момент времени τ_k процедура оценивания массы, например по амплитуде автоколебаний, существенно упрощается — достаточно оценить математическое ожидание и дисперсию, используя плотности вероятности случайных величин $S_{j1}(\tau_k)$, $j = 1, 2, 3$, которые, в свою очередь, можно оценить, например, при $j = 1$ по формуле [4]

$$f_{S_{11}}(S_{11}) = f_{A_{11}}[\psi_{11}(S_{11})] \cdot \frac{d}{dS_{11}}[\psi_{11}(S_{11})],$$

где $S_{11} = \varphi_{11}(A_{11})$ — функциональная зависимость относительного изменения массы ВТ от амплитуды автоколебаний; $f_{A_{11}}(A_{11})$ — плотность распределения вероятностей случайной величины амплитуды автоколебаний; $\psi_{11}(S_{11}) = \varphi_{11}^{-1}(A_{11})$ — функциональные зависимости амплитуды автоколебаний от относительного изменения массы ВТ; φ_{11}^{-1} — обратная функция по отношению к функции φ_{11} ; $f_{S_{11}}(S_{11})$ — плотность распределения вероятностей отклонения относительного значения массы ВТ от истинного значения при измерениях по амплитуде переходного процесса $S_{11}(\tau_k)$.

Аналогично могут быть получены формулы, необходимые для комплексной оценки вероятностных характеристик измеряемой массы ВТ по сигналам каждого из трех датчиков. Получение информации одновременно от трех датчиков втрое увеличивает объем выборки, используемой для оценки вероятностных характеристик измеряемой массы.

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИБОРА

Полученные алгоритмы могут быть использованы при изготовлении встроенного микропроцес-

сора, предназначенного для обработки информации в реальном времени. Однако оснащение измерителя системой обработки информации приведет к удорожанию прибора [2].

Поэтому возникает задача исследования операций — задача нахождения оптимального решения по двум критериям: критерию максимальной точности и критерию минимума затрат. В рассматриваемом случае упущенная выгода от неиспользования модернизации определяется объемом работ, дополнительно не выполненных из-за отказа от внедрения технического новшества (ТН). При этом должно выполняться неравенство

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ТН}} &= a_{\text{ТН}} N_{\text{ТН}} C_{\text{ТН}} - aNC < \\ &< \Pi = q \cdot C_u \cdot N - q_{\text{ТН}} \cdot C_{u\text{ТН}} \cdot N_{\text{ТН}}, \end{aligned}$$

где $\Pi_{\text{ТН}}$, Π — возможные финансовые потери; $q_{\text{ТН}}$, q — вероятности потерь результатов эксперимента; $C_{u\text{ТН}}$, C_u — доходы от проведения одного эксперимента; $N_{\text{ТН}}$, N — расчетное количество экспериментов; $C_{\text{ТН}}$, C — стоимости приборов; $a_{\text{ТН}}$, a — коэффициенты пропорциональности, имеющие смысл коэффициентов амортизации для приборов с ТН и без ТН соответственно.

В качестве вероятности q можно принять доверительную вероятность того, что модуль отклонения среднего значения \tilde{m} измеряемой массы m от ее математического ожидания \bar{m} превысит заданное значение точности ε .

Можно показать, что зависимость допустимых относительных затрат от достигаемого повышения точности МИП может быть представлена формулой

$$\frac{\Delta C_a}{C_{\text{ТН}a}} \leq K_E = qb_c \frac{1 - k_\sigma^2}{1 + qb_c + \chi_{lr}},$$

где $q = 1 - 2 \cdot \Phi_0\left(\frac{k_\varepsilon}{k_\sigma}\right)$; $k_\varepsilon = \frac{\varepsilon \cdot \sqrt{N}}{\sigma}$, $k_\sigma = \frac{\sigma_{\text{ТН}}}{\sigma}$;

$\sigma_{\text{ТН}}$, σ — среднеквадратические отклонения показаний МИП с ТН и без ТН; b_c — коэффициент чувствительности полезного эффекта (стоимости успешных результатов измерений) к величине амортизационных отчислений; χ_{lr} — заданный коэффициент эффективности; $C_{\text{ТН}a} = a_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}}$, $C_a = a \cdot C$ — обобщенные амортизационные отчисления, связанные с эксплуатацией нового и прежнего прибора; $\Delta C_a = a_{\text{ТН}} \cdot C_{\text{ТН}} - aC$ — приращение стоимости обобщенных амортизационных отчислений при внедрении ТН.

Показателем эффективности затрат на новую разработку может служить величина

$E = \frac{K_E \cdot C_{\text{Тна}}}{\Delta C_a}$, обратная отношению относительных амортизационных отчислений к их допустимому значению, т. е. обратная нормированному значению относительных затрат на модернизацию МИП.

Таким образом, предлагается учитывать в составе критерия оптимизации при синтезе МИП: относительную величину затрат, требуемое значение показателя эффективности, вероятность получения точного результата и дисперсию ошибки МИП.

Математически условие оптимизации по предложенному критерию может быть записано в виде

$$E = \frac{K_E}{\Delta C_a / C_{\text{Тна}}} \rightarrow \max.$$

В качестве примера использования предложенного критерия для оценки различных вариантов модернизации спроектированных МИП на рис. 2 приведены границы области допустимых относительных затрат в зависимости от достигнутого снижения среднеквадратического рассеивания результатов измерений k_σ . Там же отмечены допустимые (точки) и фактические (звездочки) значения относительных затрат на модернизацию для трех возможных вариантов технических решений.

Из графика следует, что для приемлемых вариантов рост относительных затрат существенно отстает. Модель эффективности позволяет прогнозировать конкурентоспособный облик МИП на этапе эксплуатации.

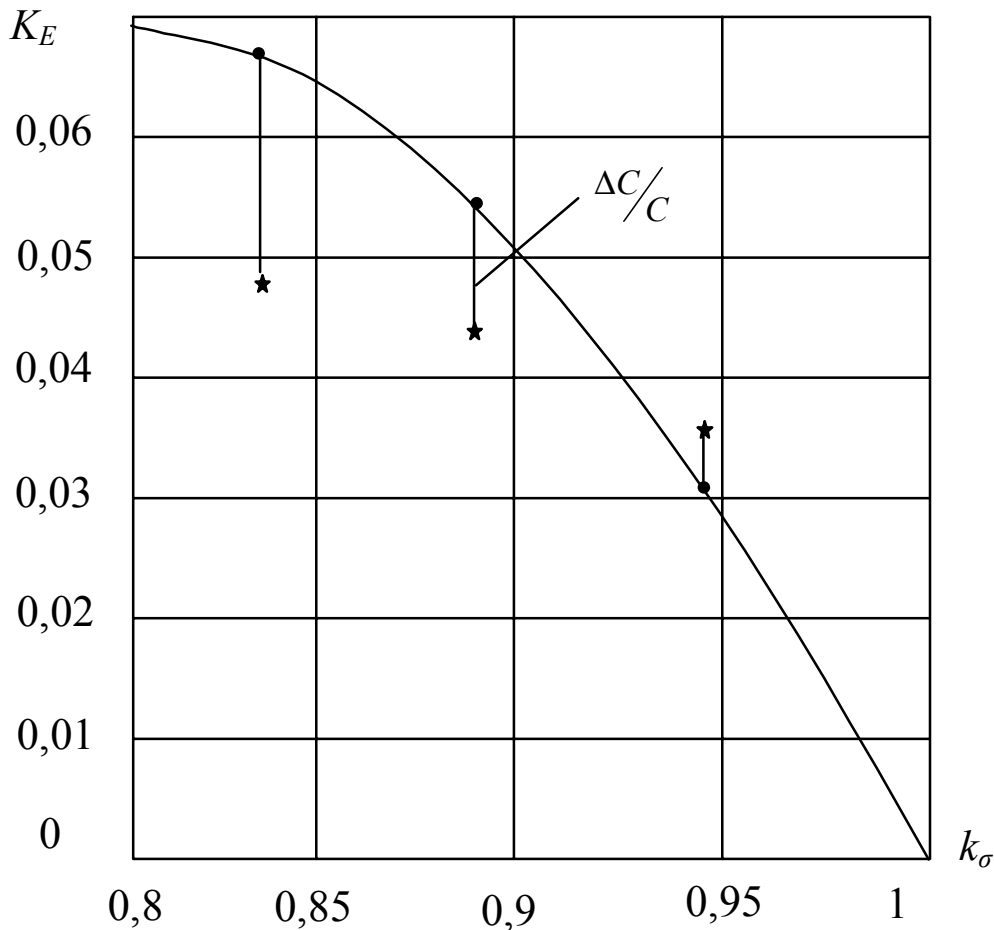


Рис. 2. Границы области допустимых относительных затрат в зависимости от достигнутого снижения среднеквадратического рассеивания результатов измерений k_σ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексирование результатов обработки экспериментальных данных, полученных при проведении измерений по трем возможным планам с использованием в каждой информации от трех независимых датчиков о трех основных параметрах колебаний ВТ, и результатов аналитического моделирования позволяет получить оценку массы ВТ с точностью, недостижимой при использовании традиционных методов измерений.

Применение предложенного подхода к формированию критериев принятия решений при проектировании МИП позволяет выявить преимущества того или иного варианта технического решения в зависимости от эффективности использования МИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников Г.А., Богословский С.В., Кизимов А.Т. Теория и практика измерительных

электромагнитных подвесов. СПб.: ГУАП, 2001. 384 с.

2. Богословский С.В. Конструктивные и алгоритмические методы совершенствования динамических аэромагнитных комплексов // Научное приборостроение. 2001. Том 11, № 2. С. 86–89.
3. Иванов Ю.П., Сняжков А.Н., Филатов И.В. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: Учебное пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.
4. Руководство для инженеров по решению задач теории вероятностей / Володин Б.Г., Ганин М.П., Динер И.Я., Комаров Л.Б., Свешников А.А., Старобин К.Б. Л.: Судпромгиз, 1962. 424 с.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Материал поступил в редакцию 29.03.2002.

INTEGRATION OF INFORMATION DURING MASS MEASUREMENT USING AN ELECTROMAGNETIC SUSPENSION

S. V. Bogoslovsky, A. O. Kadkin, G. A. Sapozhnikov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The small-sized measuring instruments based on the magnetic suspension can be successfully applied to the solution of diverse technical problems, e. g., for measurement of the mass of the tested material. The algorithms for integrating the information obtained from transducers and other control system components of the electromagnetic suspension are considered. The integration essentially increases the accuracy and reliability of measurements. The paper offers also a game-theoretical approach to the evaluation of the advisability of furnishing the instrument with a built-in data system.