водки агрегатов оценить степень оптимальности конструкций, обосновать требования к обеспечению их работоспособности и ресурса.

Литература

1. Бугаенко В.Ф. Пневоавтоматика ракетно-космических систем.-М.:Машиностроение, 1979. - 168 с.

2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний.-М.:Высшая школа, 1972. - 416 с.

3. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах.-М.:Недра, 1975. - 296 с.

УДК 629.7.036 + 518.0

В.И.Есин, М.Н.Буслаев, Ю.Г. Прядко

АНАЛИТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДАВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Известные в настоящее время системы контроля давления (СКД) силовых и энергетических установок летательных аппаратов в большинстве случаев представляют собой непроточные газовые и жидкостные линии, соединяющие контролируемый объект с датчиком давления (ДД). Трубопровод, демпфер, непроточная полость под чувствительным элементом ДД, входящие в состав непроточных СКД, могут являться источником значительных искажений информации о процессах в силовых установках.

Задачу коррекции погрешностей таких СКД необходимо решать с помощью достаточно простых и в то же время общих методов, позволяющих использовать их в широком диапазоне параметров процессов в силовых установках (входных воздействий СКД) и конструктивных параметров измерительных систем.

Одному из возможных методов аналитической коррекции погрешностей СКД, обладающему достаточной общностью, посвящена данная статья.

Задача аналитической коррекции может быть описана с помощью операторного уравнения первого рода

$$A_h \underline{z} = \underline{u}_\delta ,$$

где $\underline{z}$ - искомый вектор- входное воздействие; $\underline{u}_\delta$ - заданный с погрешностью вектор $\underline{u}\ (\|\underline{u}_\delta - \underline{u}\| \leqslant \delta)$ - выходной сигнал; A_h - известный с погрешностью оператор $A(\|A_h - A\| \leqslant h)$.

Оператор A в случае СКД описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в обыкновенных или частных производных [1] .

Обратный оператор A_h^{-1} оказывается неограниченным. Уже вследствие этого расчет $\underline{z}$ по соотношению

$$\underline{z} = A_h^{-1} \underline{u}_\delta \tag{1}$$

невозможен из-за неустойчивости алгоритмов решения.

Такая задача является некорректной и может быть решена с помощью метода регуляризации А.Н.Тихонова [2] .

Применение этого метода позволяет регуляризовать алгоритмы решения некорректных задач, сделав их устойчивыми и сходящимися.

Предлагаемая А.Н.Тихоновым методика определения оценки входного сигнала $\underline{z}_\alpha$ с помощью решения вариационной задачи

$$\Phi[\underline{z}_\alpha, \underline{u}_\delta] = \inf \Phi[\underline{z}, \underline{u}_\delta] = \inf\left[\|A_h \underline{z} - \underline{u}_\delta\|^2 + \alpha \|\underline{z}^{(q)}\|^2\right],$$

в случае нелинейных операторов A_h , описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями и уравнениями в частных производных, приводит к значительным трудностям, так как в минимизируемый функционал входит этот оператор A_h .

Удобной методикой получения регуляризованных решений задачи является методика, основанная на аппроксимации нелинейных неограниченных операторов A_h^{-1} сглаживающими сплайнами [3] .

В этом случае оценка вектора $\underline{z}$ определится из соотношения

$$\underline{z}_z = A_h^{-1} \psi \underline{u}_\delta , \tag{2}$$

где ψ - оператор сплайнового сглаживания, строящий сглаживающий сплайн $\underline{S}$ q -го порядка на векторе $\underline{u}_\delta$.

Сплайн является решением вариационной задачи

$$\Phi_1(\underline{S}) = \inf \Phi_1(\underline{u}) = \inf\left[\|\underline{u}^{(q)}\|^2 + z\,\|\underline{u}_\delta - \underline{u}\|^2\right].$$

Доказательство устойчивости, сходимости и оптимальности метода вычисления оценки $\underline{z}_z$ по соотношению (2) содержится в работе [4] .

Одной из основных задач при таком подходе является выбор оптимального параметра z_0, при котором может быть получена близкая к точной оценка $\underline{z}_{z_0}$. О точности аппроксимации нелинейных операторов с помощью (2) говорится в той же работе [4].

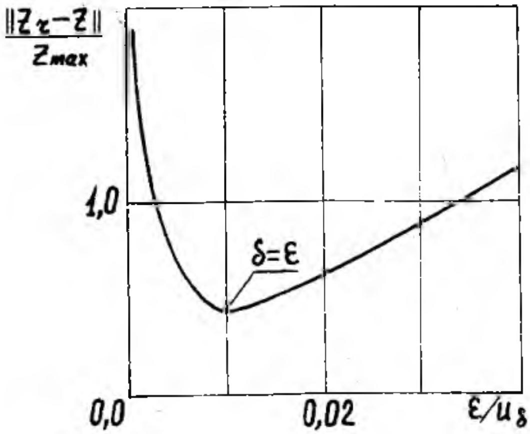
В литературе известен метод определения параметров регуляризации, к которым относится и параметр z [2]. Это метод невязки, согласующий точность определения оценки $\underline{z}_z$ с погрешностью задания вектора $\underline{u}$ на основе решения уравнения

$$\| A_h \underline{z}_z - \underline{u}_\delta \| = \delta . \tag{3}$$

Применение этого соотношения неудобно вследствие того, что не всегда известна погрешность задания вектора $\underline{u} - \delta$. Кроме того решение задачи (3) затруднено из-за сложности и нелинейности оператора A.

Проведенные исследования показали, что для определения оптимального параметра z_0 могут быть выбраны более удобные способы.

Результаты решения задачи аналитической коррекции погрешностей жидкостных и газовых СКД с помощью уравнений (2) и (3) показали, что уровень невязки $\| A_h \underline{z}_z - \underline{u}_\delta \|$ не может быть меньше определенного положительного значения, которому соответствует сплайн, уклоняющийся равномерно от $\underline{u}_\delta$ на величину $\delta (\varepsilon - \| s - \underline{u}_\delta \| = \delta)$. Такой сплайн доставляет минимум погрешности определения оценки входного воздействия $\| \underline{z}_z - \underline{z} \|$ (рис.I).



Р и с. I. Зависимость погрешности определения $\underline{z}$ от относительного уклонения ε / u_δ при $\delta = 0{,}01 u$

Вследствие этого условную минимизацию невязки по соотношению (3) (для чего необходимо знать δ) можно заменить на безусловную.

Кроме того, этот результат показал, что в качестве оптимального параметра регуляризации z_0 необходимо выбирать переменный на интервале задания выходного сигнала параметр $\underline{z}_0$, при котором сплайн равномерно уклоняется от $\underline{u}_\delta$ на величину δ .

Итерационная процедура [5] , с помощью которой можно построить такой сплайн, позволяет при известной погрешности задания выходного сигнала δ достаточно просто решить задачу в два этапа; (i + I)-я итерация в этой процедуре по определению оптимального значения j -той компоненты вектора $\underline{z}$ производится по зависимости

$$\frac{1}{z_j^{(i+1)}}=\frac{1}{z_j^{(i)}}\cdot\frac{\delta_j}{\left|S_j^{(i)}-u_{\delta j}^{(i)}\right|}. \qquad (4)$$

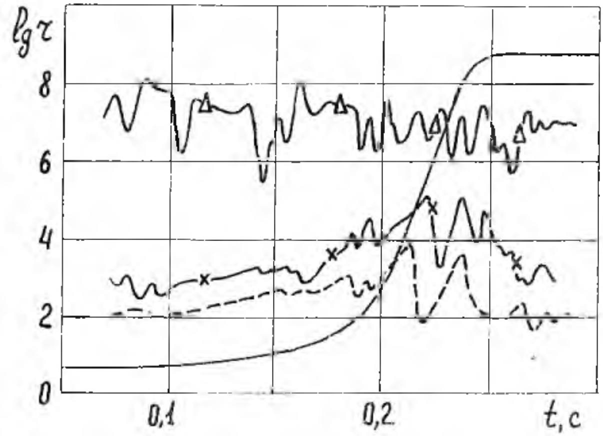
На первом этапе решения задачи с помощью (4) строится сплайн, равномерно уклоняющийся от $\underline{u}_\delta$ на δ , на втором - рассчитывается оценка входного воздействия $\underline{z}_{z_0}$ по соотношению (I), где в качестве вектора $\underline{u}_\delta$ используется аппроксимирующий его оптимальный сплайн при $z=\underline{z}_0$.

Так как оператор A_h^{-1} используется только один раз при решении задачи на втором этапе, то предлагаемая процедура определения наилучшей оценки входного воздействия $\underline{z}_{z_0}$ оказывается более простой в реализации, чем метод невязки (3).

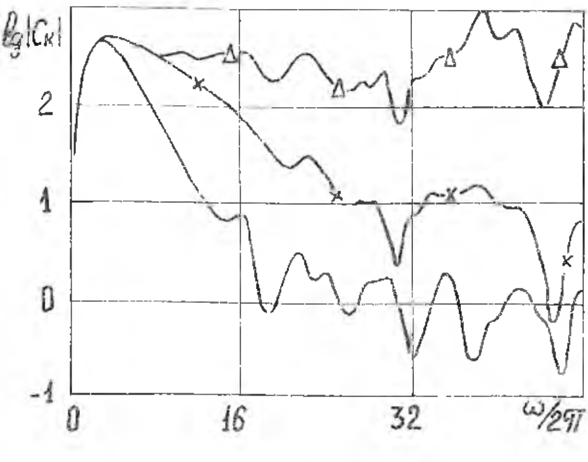
Анализ свойств сглаживающих сплайнов, аппроксимирующих сигналы разной формы с наложенными на них шумами,в численном эксперименте показал, что в области, где $\varepsilon<\delta$, рост параметра $\underline{z}$ и высших производных сплайна, начиная со второй, с уменьшением ε оказывается на несколько порядков большим по сравнению с областью, где $\varepsilon>\delta$ (рис.2 и 3). Возрастание высших производных особенно заметно на высокочастотных составляющих их энергетических спектров. Зависимость амплитуды C_K одного из таких спектров от номера гармоники K показана на рис.3.

Таким образом, при неизвестном δ по характеру изменения производных аппроксимирующего $\underline{u}_\delta$ сплайна и параметра регуляризации $\underline{z}$ с изменением ε можно приближенно определить ту область, где $\varepsilon\simeq\delta$, а следовательно, и $\underline{z}=\underline{z}_0$.

Таким образом, оптимальная коррекция погрешностей СКД возможна более простым методом, чем метод невязки,и при неизвестной



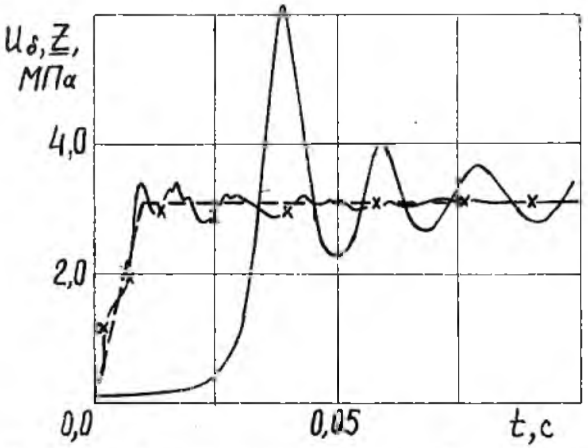
Р и с. 2. Значения параметра $\underline{z}$ при аппроксимации сплайном сигнала $u_\delta(t)$ при $\delta = 0{,}01u$:
- - - $\varepsilon = 0{,}05u$; - x - $\varepsilon = 0{,}01u$; -Δ- $\varepsilon = 0{,}001u$



Р и с. 3. Спектры второй производной сплайна, аппроксимирующего сигнал u_δ при $\delta = 0{,}01u$:
—— $\varepsilon = 0{,}05u$; — x — $\varepsilon = 0{,}01u$;
—Δ— $\varepsilon = 0{,}001u$

погрешности задания выходного сигнала δ. В этом случае после определения $\underline{z}_0$ наилучшая оценка входного воздействия $\underline{z}_{z_0}$ определяется так же, как и при известном δ, по соотношению (I), используя найденный вектор $\underline{z}_0$.

Предлагаем один из примеров решения задачи аналитической коррекции погрешностей СКД силовых установок летательных аппаратов для практической СКД с длиной трубопровода 0,98 м, диаметром – $4 \cdot 10^{-3}$ м, с задемпфированной непроточной полостью под ДД объемом 10^{-6} м^3 (рис.4). При решении использовалась аппроксимация оператора A_h^{-1} полиномиальными сглаживающими сплайнами второго порядка.



Р и с. 4. Восстановление сигнала $\underline{z}$ для гидравлической СКД: —— x —— оценка входного сигнала $z_z(t)$; ——— выходной сигнал $u_\delta(t)$; - - - - входной сигнал $z(t)$

Таким образом, аппроксимация сглаживающими сплайнами нелинейных неограниченных дифференциальных операторов позволяет получить устойчивые и сходящиеся алгоритмы решения некорректной задачи восстановления входных воздействий СКД по заданным с погрешностью выходным сигналам. Предложены более простые, чем при использовании метода невязки, способы оптимальной аналитической коррекции погрешностей СКД, применимые как при известной, так и неизвестной погрешности задания выходного сигнала.

Поскольку [4] свойства оптимальности, устойчивости и сходимости алгоритма (2) при условии (3) справедливы для широкого класса операторов A_h^{-1}, то указанные выше методики коррекции погрешностей СКД могут быть применены для решения многих других некорректных задач, возникающих при синтезе, идентификации динамических объектов [2], а также для аналитической коррекции погрешностей многих других измерительных систем.

Литература

1. Герц Е.В., Есин В.И., Прядко Ю.Г. Исследование переходных процессов в пневматических системах.- В сб.: Механика машин.- М.:Наука, 1974. Вып. 43, с.95-104.

2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач.-М.:Наука, 1974. - 224 с.

3. Лоран П.-Ж. Аппроксимация и оптимизация.-М.:Мир,1975.- 496 с.

4. Гребенников А.И. Метод сплайнов и решение некорректных задач теории приближений.-М.:Изд-во МГУ, 1983.- 208 с.

5. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций.-М.:Наука, 1980. - 352 с.

УДК 621.43.038-772.002.3

А.М.Жижкин, Е.А.Изжеуров

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ СТРУКТУРЫ НА ГИДРОДИНАМИКУ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Пористые металлы находят широкое применение в элементах гидропневмоавтоматики летательных аппаратов для целей дросселирования и фильтрации.

Особенности изготовления элементов гидропневмоавтоматики из пористых металлов существенно влияют на их проницаемость. В частности, при изготовлении пористых конструкций из-за сил трения о стенки матриц имеет место анизотропия структуры в них.

Качественный характер этого явления отмечают многие исследо-