Зависимости, позволяющие оценить эффективность алгоритмов, приведены на рис. 4.

Выражения (13), (14) были получены в работе 1 на основе других соображений.

Таким образом, в работе показана возможность анализа эффективности оценки приближения линейной зависимостью полиномов, степень которых не превышает трех, алгоритмами адаптивной дискретизации, использующими интегральные операторы.

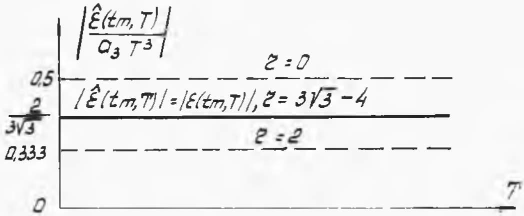

Рис. 3.

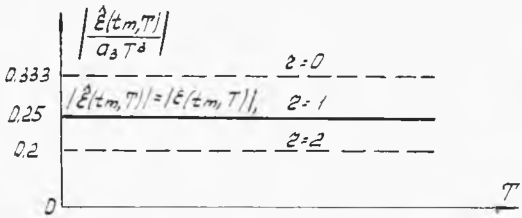

Рис. 4.

Результаты анализа показали, что при локальных распределениях отношения a_2/a_3T возможен синтез алгоритмов, использующих линейные комбинации интегральных операторов с самим сигналом, позволяющих получать близкие к точным оценки максимальной ошибки приближения. Для «размытых» распределений точность оценок существенно ухудшается.

Использование нелинейных комбинаций интегральных операторов из самого сигнала позволяет получить более точные оценки максимальной ошибки приближения, но приводит к усложнению алгоритмов, а следовательно, и к трудностям их практической реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виттих, В. А., Якимаха В. П. Синтез алгоритмов сжатия измерительной информации на основе использования структурных моделей сигналов. «Известия вузов». «Приборостроение». № 3, 1972.

В. В. Пшеничников

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

При динамических измерениях сигнал, проходя по тракту измерительной системы, искажается вследствие инерционности некоторых звеньев системы (например, датчиков). Одна из важных задач обработки результатов измерения состоит в определении входного сигнала $s(t)$ по результату измерения $y(t)$ и по известной импульсной переходной характеристике системы $H(\zeta)$.

С математической точки зрения задача сводится к решению интегрального уравнения

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\zeta)\, s(t-\zeta)\, d\zeta. \tag{1}$$

Если выходной сигнал искажен помехой, то задача становится некорректной, т. е. малым отклонением сигнала $y(t)$ могут соответствовать сколь угодно большие отклонения восстановленного $s(t)$ [1].

Решение интегрального уравнения (1) будем искать в частотной области с использованием метода регуляризации А. Н. Тихонова.

Регуляризованное решение $s_\alpha(t)$ определится из соотношения [2]

$$S_\alpha(f) = \frac{H^*(f)\, y(f)}{H(f)^2 + \alpha M(f)}, \tag{2}$$

где α — параметр регуляризации; Mf — заданная четная неотрицательная функция, удовлетворяющая условиям

$$M(\theta) = 0;\ M(f) > 0 \text{ при } f > 0;$$

для достаточно больших f $M(f) \geqslant c > 0$.

Из выражения (2)

$$s_\alpha(f) = \frac{1}{1+\alpha N(f)} \frac{y(f)}{H(f)},$$

где $N(f) = \frac{M(f)}{H(f)^2}$ — регуляризирующий оператор.

Регуляризирующий оператор определяется из условия $\min (s(f) - s_2(f))^2$. Это условие удовлетворяется при

$$N(f) = \frac{p(f)}{H(f)^2 L(f)},$$

где pf — энергетический спектр помехи, $L(f)$ — энергетический спектр сигнала $s(t)$.

Для реальных систем и сигналов асимптотика функций $\|H(f)\|^2$ и $L(f)$ при больших f имеет вид $|H(s)|^2 = \frac{b}{f^{2p}}$ и $L(s) = \frac{c}{f^{2p}}$, где b и c — константы.

Если помеха представляет собой «белый шум», то $p(t)$ также константа. Тогда регуляризирующий оператор примет вид $N(f) = f^{2p}$. Для измерительных сигналов и инерционностей линейных систем 1-го порядка $N(f) = f^4$. Параметр регуляризации

α составляет величину порядка (0,01—0,1). Выбор α, при котором ошибка восстановления была минимальна, проводился экспериментально. Оптимальная величина α^{opt} в значительной степени зависит от отношения «сигнал/шум» и от вида $N(f)$.

Вышесказанное позволяет построить алгоритмы восстановления входного сигнала по известному выходу и характеристике системы. Процедура восстановления сигналов в частотной области реализована на ЭВМ «БЭСМ-4» на основе применения алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) [3], что позволило резко сократить затраты машинного времени на переход в частотную область и обратно. Эксперимент проводился для сигналов треугольной и трапецеидальной формы, прошедших инерционное звено 1-го порядка, при наличии аддитивной гауссовой помехи. Погрешность восстановленного сигнала $s_2(t)$ по отношению к $s(t)$ оценивалась по среднеквадратическому критерию. Число отсчетов при дискретизации исходного сигнала 32.

Погрешность выходного сигнала по отношению к входному составляла 40%.

Результаты экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Форма сигнала	Отношение сигнал/шум	Регуляризирующий оператор $N(s)$	Параметр регуляризации α	Погрешность восстановленного сигнала δ
Треугольная	10	1	0,37	12
»	»	f	0,06	3,6
»	»	f^2	0,035	1
»	»	f^4	0,015	0,57
Трапецеидальная	10	1	0,23	12
»	»	f	0,03	5,7
»	»	f^2	0,01	5
»	»	f^4	0,005	3,2

Из таблицы 1 видно, что погрешность восстановления минимальна при $N(f)=f^4$. Это подтверждает правильность выбора вида регуляризирующего оператора.

Эксперименты показали эффективность алгоритма восстановления сигнала в частотной области с использованием регуляризаторов вида f^{2p}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. ГИФМЛ. М., 1962.

2. Арсенин В. Я., Иванов В. В. Об оптимальной регуляризации. ДАН СССР, 182, № 1. 1968.

3. Бригхем, Морроу. Быстрое преобразование Фурье. ТИИЭР, т. 55, № 10, 1967.