

### **Список использованной литературы**

1. Горячкин В.П. О физико-механических и агротехнических свойствах почвы / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 7 т. - М.: Сельхозгиз, 1940. – Т.4, - С. 237-244.
2. Сисолін П.В. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Підруч. студ. вищ. навч. закл. / П.В. Сисолін, В.М. Сало, В.М. Кропивний; За ред. М.І. Черновола. – Кн.1: Машини для рільництва. - К.: Урожай, 2001.– 384 с
3. Ветохин В.И. Систематизация свойств почвы как элемент теории проектирования почвообрабатывающих орудий и технологий / В.И. Ветохин // Техніко-технологічні аспекти розвитку та впровадження нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. наукових праць. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. - Вип. 13(27), Кн.2, - С. 30-38.
4. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. - Взамен ГОСТ 5180-75, 5181- 78, 5182-78, 5183-77; Введ. 01.07.85 [Текст] / ГОСТ 5180-84. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 24 с.
5. Ветохін В.І. Деякі аспекти використання властивостей ґрунту при проектуванні ґрунтообробних процесів та знарядь / В.І. Ветохін // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК / Редкол.: С.М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. – К., 2015. – Вип. 226. – С.315-321.

**УДК 621-521**

### **ИНТЕРВАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ**

**Ю.А. Судник, д.т.н., профессор**  
*РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, РФ*

#### **Введение**

Для решения широкого класса задач идентификации мобильных агрегатов как объектов управления (ОУ) широко используют методы имитационного моделирования. При этом, в качестве моделей

ОУ применяют в основном детерминированные или стохастические модели, использование которых (из-за введения различных допущений и наличия погрешностей измерений) не позволяет гарантировать точности результатов исследования. Так, известная система предпосылок, в основном статистического характера (детерминированность входных переменных и параметров, некоррелированность выходных переменных, нормальный закон их распределения), на которой базируется классический регрессионный анализ (широко применяемый для идентификации мобильных агрегатов), в реальных задачах нередко не соблюдается. К тому же, в известных методах моделирования ОУ не всегда учитываются различного рода погрешности и ошибки измерений.

В последнее время в качестве вычислительных методов, гарантирующих точность результатов исследований, используют аппарат интервальной математики [1,2], в котором реальные числа  $a, b, \dots$  заменяют интервалами, обозначающиеся как  $[a], [b], \dots$ . Под интервалом  $[a] = [a^-, a^+]$ ,  $a^- \leq a^+$  будем понимать замкнутое ограниченное подмножество  $R$  всех вещественных чисел  $x$  вида

$$[a] = [a^-, a^+] = \{x \in R \wedge a^- \leq x \leq a^+\},$$

т. е.  $a$  может принимать любое значение внутри интервала, левая и правая границы которого обозначаются соответственно как  $a^-$  и  $a^+$ . Существуют правила [1,2] выполнения арифметические операций над интервалами (интервальными числами), оперирования с интервальными функциями, векторами и матрицами.

### Основная часть

Разработан метод интервальной идентификации ОУ, позволяющий использовать нестатистический подход. Так, измеренное значение сигнала  $\tilde{y}(x)$  на выходе ОУ имеет вид:  $\tilde{y}(x) = y(x) + e_y$ ,

где  $y(x)$  – истинное значение сигнала на выходе ОУ;  $x$  – значение сигнала на входе ОУ;  $e_y$  – помеха, приложенная к выходу ОУ (обусловлена ошибками измерений, случайными погрешностями измерительных преобразователей, шумами, неконтролируемыми возмущениями и др.)

Качество управления ОУ согласно критерию минимизации интервальных значений дисперсии  $[D_y]$  управляемой величины можно определить как:

$$[D_y] = [\sigma_y]^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty [|\Phi_{yf}(jw)|]^2 S_{ff}(w) dw \Rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\forall |\Phi_{yf}(jw)| \in [|\Phi_{yf}^-(jw)|, |\Phi_{yf}^+(jw)|],$$

где  $[|\Phi_{yf}(jw)|]$  – интервал модуля комплексной частотной характеристики системы (по каналу действия эквивалентного возмущения на управляемую величину),  $S_{ff}(w)$  – спектральная плотность эквивалентного (приведенного непосредственно к выходу объекта управления) возмущения  $F(t)$ . Для нахождения точных границ интервала (1) необходимо вычислить наибольшее и наименьшее значения  $D_y$  при изменении  $|\Phi_{yf}(jw)|$  в известных пределах. По аналогии с точечными оценками в теории автоматического управления пределы в виде интервала частотной характеристики  $[\Phi_{yf}(jw)]$  можно записать так:

$$[\Phi_{yf}(jw)] = \frac{1}{\{ 1 + [W_{oy}(jw)][W_{yy}(jw)] \}}, \quad (2)$$

где  $[W_{oy}(jw)], [W_{yy}(jw)]$  – интервалы частотных характеристик объекта и узла управления.

Для большинства ОУ свойственны разброс (вариации) и нечёткость частотных характеристик и их оценок, а также недостоверность истинных значений параметров мобильных агрегатов. В связи с этим для ОУ необходимо использование интервальных моделей амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-фазовых (АФХ) характеристик с интервалом множества АЧХ (имеющего границы  $A^+(w)$  и  $A^-(w)$  и интервалом множества АФХ (имеющего границы  $\varphi^-(w), \varphi^+(w)$ ).

Учитывая, что  $|W_{oy}(jw)| \equiv A(w) = \sqrt{[\operatorname{Re} W(jw)]^2 + [\operatorname{Im} W(jw)]^2}$   
и  $\arg W_{oy}(jw) \equiv \varphi(w) = \arctg \frac{\operatorname{Im} W_{oy}(jw)}{\operatorname{Re} W_{oy}(jw)},$

запишем выражения для интервалов множеств АЧХ и АФХ:

$$A^+(w) = \max_{a \in \Omega_a} A(w) = \max_{a \in \Omega_a} \left\{ \sqrt{\operatorname{Re}^2(\vec{a}, w) + Jm^2(\vec{a}, w)} \right\};$$

$$A^-(w) = \min_{a \in \Omega_a} A(w) = \min_{a \in \Omega_a} \left\{ \sqrt{\operatorname{Re}^2(\vec{a}, w) + Jm^2(\vec{a}, w)} \right\}, \text{ т. е.}$$

$$[A(w)] = [A^-(w), A^+(w)]. \quad \varphi^-(w) = \min_{a \in \Omega_a} \varphi = \min_{a \in \Omega_a} \arctg \frac{J_m(w)}{\operatorname{Re}(w)};$$

$$\varphi^+(w) = \max_{a \in \Omega_a} \varphi = \max_{a \in \Omega_a} \arctg \frac{J_m(w)}{\operatorname{Re}(w)}, \text{ т. е. } [\varphi(w)] = [\varphi^-(w), \varphi^+(w)].$$

Интервалы множеств АЧХ и АФХ, т. е.  $[A(w)]$  и  $[\varphi(w)]$ , гарантированно содержат истинные АЧХ и АФХ ОУ.

Установлено, что для частотного диапазона возмущений реальных ОУ справедливо правило уменьшения отношения  $\left[ \frac{T_u}{k_{yy}} \right]$  с целью минимизации интервала значений дисперсии  $[D_y]$ .

После преобразования выражения (2) можно получить для  $[\alpha_o] = \frac{[k_{oy}][k_{yy}]}{[T_u]^\xi}$ , причём  $[k_{oy}], [k_{yy}]$  – интервалы возможных значений коэффициентов передачи объекта и узла управления,  $[T_u]$  – интервал значений постоянной интегрирования узла управления, а  $\xi$  – степень астатизма системы управления (СУ).

По аналогии с известным подходом [3] по минимизации точечных оценок  $D_y$  и оценке параметров настройки узла управления (методом вспомогательной функции) с учётом интервального характера параметра  $\alpha_o$  продифференцировано выражение (3) по  $\alpha_o$ :

$$\left[ \frac{d\Phi_{yf}(jw)}{d\alpha_o} \right] = - \frac{[\Phi_{yf}(jw)]}{[\alpha_o]} \operatorname{Re} \{ 1 - [\Phi_{yf}(jw)] \}.$$

Следовательно, с учётом отрицательного знака производной можно заключить, что интервал модуля комплексной частотной характеристики системы  $[\Phi_{yf}(jw)]$  уменьшается при увеличении  $[\alpha_o]$ , где  $\operatorname{Re}\{1 - [\Phi_{yf}(w)]\} > 0$ .

Для реализации условия выражения (1) достаточно выполнить требование

$\left[\frac{1}{\alpha_o}\right] \Rightarrow \min$ , которое показывает, что для минимизации интервала дисперсии управляемой величины в интервале частот (возмущений ОУ)  $w \in [0, w_2)$  необходимо увеличивать величину  $\alpha_o$  свободного члена характеристического уравнения АС, интервал которой (для ПИ-, ПИД- узлов управления) равен  $[\alpha_o] = \frac{[k_{oy}][k_{yy}]}{[T_u]}$ .

При этом работоспособность СУ учитывается ограничением отношения  $\frac{[k_{yy}]}{[T_u]}$  на интервал показателя  $[M]$  колебательности системы

управления, причём  $[M] \leq M_{\text{дон}}$ , где  $M_{\text{дон}}$  – заданное предельно-допустимое значение показателя колебательности АС.

В этом случае система будет удовлетворять критерию технологической работоспособности, при котором  $\frac{\sigma_f}{\sigma_y} \geq k_{\text{дон}}$ , где  $\sigma_y, \sigma_f$  – соответственно среднеквадратические отклонения (управляемой величины) при наличии управления объектом и при отсутствии всякого управления им, а  $k_{\text{дон}}$  – допустимый коэффициент технологической работоспособности системы.

Для заданных интервальных оценок  $[\gamma] = [\gamma^-, \gamma^+]$  и  $[T_\partial] = [T_\partial^-, T_\partial^+]$  могут быть определены интервалы  $[k_{yy}]$  и  $[f]$ , где максимум последнего совпадает с максимумом интервала

$\left[ \frac{k_{yy}}{T_u} \right]$  на линии равного значения  $M$ . Таким образом, оптимальные интервальные оценки параметров  $[k_{yy}]$ ,  $[T_u]$ ,  $[T_\partial]$  узла управления могут быть вычислены путём поиска таких значений частот, при которых интервал  $[f]$  в промежутке изменения угла  $\gamma(w) \in [-\pi/2, \arccos 1/M] < \pi/2$  принимает максимальное значение. По найденному значению оптимальной частоты, согласно выражениям для  $[f]$  и  $[k_{yy}]$ , вычисляют значения последних, после чего определяют  $[T_u]$ ,  $[T_\partial]$ . Такие интервальные оценки АЧХ и АФХ позволяют гарантировать результат и проводить анализ устойчивости, качества и синтез АС с учётом неточностей описания ОУ.

### **Заключение**

1. Использование детерминированных и стохастических моделей ОУ не позволяет гарантировать точности результатов исследования. 2. Разработан метод интервальной идентификации ОУ, позволяющий использовать нестатистический подход. 3. Интервальные оценки АЧХ и АФХ ОУ позволяют гарантировать результат исследования и проводить анализ устойчивости, качества и синтез автоматической системы с учётом неточностей описания ОУ.

### **Список использованной литературы**

1. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986, 222 с.
2. Moore R. E. Interval analysis. N. Y., Prentice Hall, 1966. P. 112.
3. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М. : Энергия, 1973.