

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 517.3:007.3

**Ю.А. СУДНИК, С.А. АНДРЕЕВ**

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Известная система предпосылок, в основном статистического характера (детерминированность входных переменных параметров, равнозначность и некоррелированность выходных, нормальный закон их распределения), на которых базируется классический регрессионный анализ, широко применяемый для идентификации объектов управления, в реальных задачах нередко не соблюдается. В статье предложено в качестве нового вычислительного метода, гарантирующего точность результатов исследований при анализе и синтезе автоматических систем, использовать аппарат интервальной математики, в котором реальные (точечные значения) числа заменяют их интервальными значениями. Это подтверждает научную новизну темы исследования. Целью последнего является разработка метода интервального анализа и синтеза автоматических систем объектов управления на примере мобильных сельскохозяйственных агрегатов. Метод и методика исследования предусматривают проведение эксперимента, принятие математической модели объекта управления (ОУ), её оценку, определение интервальных и точечных его параметров, адекватности и характеристика точности, проверку значимости коэффициентов и прогноз выходных сигналов ОУ. Предлагаемый подход позволяет моделировать сельскохозяйственные агрегаты как сложные динамические ОУ и контролировать точность их построения, что предопределяет создание эффективных по качеству и устойчивости автоматизированных систем управления. Авторами разработан метод интервальных оценок амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых характеристик, позволяющих проводить анализ устойчивости, качества и синтез систем управления с учётом неточностей описания ОУ.

*Ключевые слова:* автоматическая система, мобильный сельскохозяйственный агрегат, объект управления, идентификация, фазовая и частотная характеристики, интервальная арифметика

Большинство реальных систем управления (СУ) имеют неопределённые параметры, внешние возмущения и начальные условия, у которых интервалы с заданными границами. Из-за невозможности достаточно точного описания мобильных сельскохозяйственных агрегатов как объектов управления (ОУ) интервальная неопределённость присуща любому их виду: непрерывным, дискретным, линейным, нелинейным, распределённым.

Для решения задач идентификации таких ОУ, анализа и синтеза их СУ широко используют методы имитационного моделирования. При этом в качестве моделей применяют в основном детерминированные или стохастические, использование которых (из-за введения различных допущений и имеющихся погрешностей измерений) не позволяет гарантировать точность результатов исследований.

Так, известная система предпосылок, в основном статистического характера (детерминированность входных переменных параметров, равнозначность и некоррелированность выходных, нормальный закон их распределения), на которых базируется классический регрессионный анализ, широко применяемый для идентификации ОУ, в реальных задачах нередко не соблюдается. К тому же в известных методах их моделирования не всегда учитываются различного рода погрешности и ошибки измерений, величины которых в отдельных случаях могут быть соизмеримы с уровнями контролируемых полезных сигналов.

В последнее время в качестве вычислительных методов, гарантирующих точность результатов исследований, используют аппарат интервальной математики [1...3], в котором реальные числа  $a$ ,  $b$ ...

заменяют такими, как  $[a]$ ,  $[b]$ ... Под интервалом  $[a] = [a^-, a^+]$ ,  $a^- \leq a^+$  следует понимать замкнутое ограниченное подмножество  $R$  всех вещественных чисел  $x$  вида

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

т.е.  $a$  может принимать любое значение внутри него, левая и правая границы обозначаются соответственно как  $a^-$  и  $a^+$ . Существуют правила выполнения арифметические операций с интервалами, оперирования с их функциями, векторами и матрицами.

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

$$\tilde{y}(x) = y(x) + e_y,$$

где  $y(x)$  – истинное значение сигнала на выходе;  $x$  – значение сигнала на входе;  $e_y$  – помеха на выходе обусловленная ошибками измерений, случайными, систематическими, прогрессирующими погрешностями преобразователей, различными неопределенностями, шумами, неконтролируемыми возмущениями и др. [4].

Примем также допущения относительно значения помехи  $e_y$ : измерение точных (истинных) значений выходного сигнала невозможно из-за помехи, искажающей его истинное значение; амплитуда помехи ограничена и может принимать любые значения в заданном интервале  $[-\Delta; +\Delta]$ , причем абсолютная погрешность  $\Delta$  известна, т.е.  $e_y < |\Delta|$ ; закон распределения помехи не определяется и нередко имеет неслучайный характер.

Объект управления, для которого свойственны изложенные предпосылки, называют (по определению А.П. Вошинина) с ограниченной по амплитуде ошибкой или с интервальной неопределенностью [5].

Алгоритм построения интервальных моделей ОУ предусматривает проведение эксперимента, принятие математической и её оценки, определение интервальных и точечных параметров, адекватности и характеристика точности, проверку значимости коэффициентов и прогноз выходных сигналов [6].

Классическая процедура моделирования заключается в определении значений выходного сигнала при подаче на вход различных воздействий. Рассмотрим вариант построения интервальных моделей базовых МСА как ОУ при наличии ошибок измерений только выходного сигнала (допущение: ошибки определения входных сигналов отсутствуют).

Проведение эксперимента: допустим, ОУ содержит вектор  $\vec{x}_i$ . В результате с  $N$  опытами получены значения  $\vec{x}_i$ ,  $[y_i]$ , где каждому будет соответствовать интервал

$$[y_i], \text{ т.е. } x_i \Rightarrow [y_i],$$

где  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  – число опытов, наблюдений входного вектора  $x_i$  и выходной переменной  $[y_i]$ .

При сформулированных выше предпосылках истинное значение сигнала  $y_i$  на выходе в каждом из опытов гарантированно принадлежит заданному интервалу  $[y_i]$ :

$$y_i - \Delta \leq y_i \leq y_i + \Delta; e \Rightarrow \Delta.$$

Математическая модель ОУ:

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}), \quad (2)$$

где  $a_j$  – неизвестные параметры (коэффициенты);  $\phi_j(\vec{x})$  известные базисные функции модели.

При этом в условиях интервальной неопределённости  $[y_i]$  существует бесчисленное множество параметров  $a_j$  – модели, которые принадлежат некоторому множеству  $\Omega_a$  (рис. 1):

$$a_j \in \Omega_a.$$

Так как область  $\Omega_a$  имеет сложную форму, то обычно её заменяют прямоугольной призмой  $[\vec{a}]$ , которая определяет отдельные интервалы коэффициенты  $a_j$ :

$$\vec{a} = \{[a_1], [a_2], \dots, [a_n]\}.$$

На рисунке 1 такая замена в форме прямоугольника показана пунктирными линиями.

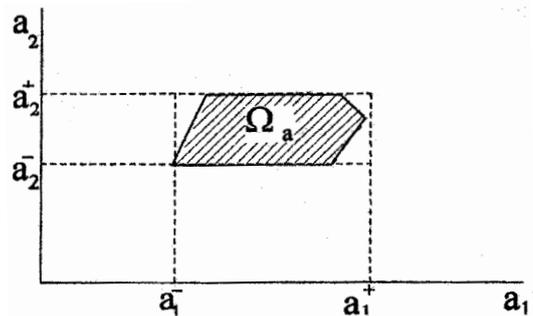


Рис. 1. Область множества возможных значений параметров модели МСА как ОУ (для случая n = 2)

Таким образом, в методе интервальной идентификации задача построения модели ОУ заключается в нахождении множества  $\Omega_a$ , которое не противоречит экспериментальным данным. При этом интервальная модель (2) не противоречит экспериментальным данным только тогда, когда она проходит через все  $N$ -интервалы (рис. 2).

$$\sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}) \in [y_i^-, y_i^+] \text{ или } y_i^- \leq \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}) \leq y_i^+, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Для фиксированных значений  $\vec{x}_i$  (для каждого  $i$ -го опыта) соотношения (3) являются системой линейных неравенств (в пространстве параметров  $a_j$ ),

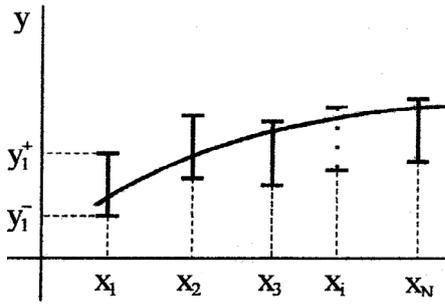


Рис. 2. Модель ОУ, адекватная интервальным измерениям

решив которые, можно найти множество  $\Omega_a$  допустимых моделей исследуемого ОУ.

Область  $\Omega_a$  является выпуклой фигурой в форме многогранника (рис. 1); вектор неизвестных параметров  $\vec{a}_j$  принадлежит области  $\Omega_a$ , т.е.  $\vec{a}_j \in \Omega_a$ ; если число опытов  $N \rightarrow \infty$ , то  $\lim \Omega_a \rightarrow a_0$  ( $a_0$  – точечная оценка параметра).

Интервальная оценка параметров (коэффициентов) модели определяется из условия [7]:

$$a_j^- = \min a_j \text{ и } a_j^+ = \max a_j, \text{ причем } \vec{a} \in \Omega_a, \text{ а } a_j \in [a_j^-, a_j^+]; j \equiv \overline{1, n}.$$

Точечная оценка  $a_j$  – любой вектор  $\vec{a}$  в области  $\Omega_a$ .

Так, средняя  $\vec{a}_j = \frac{a_j^- + a_j^+}{2}$  при  $j = \overline{1, n}$ .

Выбранная модель (2) не должна противоречить экспериментальным данным и требует включения всех необходимых базисных функций  $\phi_j(\vec{x})$ . При этом, если множество  $\Omega_a \neq \emptyset$ , то она считается адекватной объекту.

Точность  $\delta$  модели:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+ + y_i^-}.$$

При  $\delta \leq \epsilon$  она считается работоспособной и отвечающей допустимому значению ошибки  $\epsilon$ .

Если интервал параметра  $[a_j] = [a_j^-, a_j^+] \neq 0$ , то коэффициент  $a_j$  является значимым и должен быть включенным в модель (2). В противном случае  $a_j$  исключается из нее, так как он может иметь нулевое значение. Точечный прогноз выходного сигнала ОУ описывается выражением

$$\hat{y}_o(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(\vec{x}),$$

где  $a_j$  – точечная оценка параметров ОУ.

Интервальный выходного –

$$[\hat{y}(x)] = [y^-(x), y^+(x)].$$

Определяется он по зависимостям:

$$\hat{y}^-(x) = \min \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(x) \text{ при } a_j \in \Omega_a;$$

$$\hat{y}^+(x) = \max \sum_{j=1}^n a_j \phi_j(x) \text{ при } a_j \in \Omega_a.$$

Таким образом, представленный алгоритм построения моделей МСА как ОУ позволяет комплексно оценить их основные параметры и характеристики.

Представим модель МСА (как сложный динамический объект) в виде соединения статического и динамического звеньев, связанных между собой. Статическое звено согласно (2) описывается уравнением

$$y = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \phi_j(x), t = \overline{1, N}, \quad (4)$$

а динамического – разностными линейными:

$$y(t) = \sum_{j=1}^m b_j \cdot y(t-j) + \sum_{j=0}^m c_j x(t-j), t = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $b_j, c_j$  – неизвестные параметры.

По аналогии с (1) рассмотрим случай, когда

$$\tilde{y}(t) = y(t) + e_y; \quad \tilde{x}(t) = x(t) + e_x, \quad (6)$$

где  $e_x$  – помеха, на входе ОУ (рис. 3).

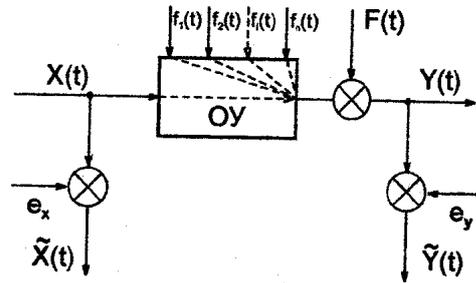


Рис. 3. Схема наличия сигналов на входе и выходе ОУ

Примем известными структуру модели, параметры системы  $a_j, b_j, c_j$  с точностью до интервалов, а также величины  $n, m$  и функции  $\phi_j$ .

Выражения (4), (5), (6) являются достаточно универсальными и позволяют моделировать широкий класс МСА как сложных динамических ОУ.

Для данного случая задача моделирования заключается в расчете интервального прогноза значения сигнала на его выходе:  $[\hat{y}(t)] = [\hat{y}^-(t), \hat{y}^+(t)]$ ,  $t = \overline{1, N}$  при заданных на входе  $[x(t)] = [x^-(t), x^+(t)]$  и интервалах параметров  $[a_j], [b_j], [c_j]$ . При этом должны выполняться условия:

$$y(t) \in [\hat{y}(t)], \delta[\hat{y}(t)] \Rightarrow \min, t = \overline{1, N},$$

где  $\delta[\hat{y}(t)]$  – ширина интервала прогноза значений выходного сигнала.

Интервальный прогноз значений выходных сигналов для моделей статики (4) и динамики (5) соответственно:

$$[\hat{y}] = \sum_{j=1}^n [a_j] \cdot \varphi_j \{ \vec{x} \}; \quad (7)$$

$$[\hat{y}(t)] = \sum_{j=1}^m [b_j][y(t-j)] + \sum_{j=0}^m [c_j][x(t-j)]. \quad (8)$$

Если  $\delta[\hat{y}(t)] \leq \varepsilon$ , условие требуемой точности модели выполняется, если же больше, то необходимо снизить уровень неопределенности за счёт усложнения структуры модели или увеличения числа опытов и интервалов входных сигналов. Аналогичный алгоритм оценки точности моделирования целесообразно использовать и для моделей динамики [8...11].

Таким образом, предлагаемый подход позволяет моделировать МСА как сложные динамические ОУ и контролировать точность их построения, что предопределяет создание эффективных по качеству и устойчивости автоматизированных СУ.

На мобильный агрегат действует многообразие различных контролируемых и неконтролируемых возмущений, функцию минимизации суммарного эффекта которых должна качественно выполнять СУ. Для интервального анализа проведена оптимизация качества управления (технологическими и энергетическими режимами работы) МСА согласно критерию минимизации значений дисперсии  $[D_y]$  или среднеквадратического отклонения  $[\sigma_y]$  управляемой величины:

$$[D_y] = [\sigma_y]^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [|\Phi_{yF}(j\omega)|]^2 S_{ff}(\omega) d\omega \Rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\forall |\Phi_{yF}(j\omega)| \in [|\Phi_{yF}^-(j\omega)|, |\Phi_{yF}^+(j\omega)|],$$

где  $[|\Phi_{yF}(j\omega)|]$  – интервал модуля комплексной частотной характеристики системы;  $S_{ff}(\omega)$  – спектральная плотность эквивалентного, приведенного непосредственно к выходу объекта, возмущения  $F(t)$ .

Особенностью  $F(t)$  является то, что оно доступно для непосредственного измерения и позволяет его корреляционную функцию и спектральную плотность оценивать экспериментально. Для реализации этого возмущения необходимо прекратить управление – как ручное, так и автоматическое, – объектом.

Для нахождения точных границ интервала (9) необходимо вычислить наибольшее и наименьшее значения  $D_y$  при изменении  $|\Phi_{yF}(j\omega)|$  в известных пределах [12, 13]. По аналогии с точечными оценками в теории автоматического управления пределы в виде интервала ее частотной характеристики можно записать:

$$[\Phi_{yF}(j\omega)] = \frac{1}{1 + [W_{oy}(j\omega)][W_{yy}(j\omega)]}, \quad (10)$$

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

Непосредственное же (традиционное) использование точечной оценки частотных характеристик для (9) и (10) в рассматриваемом случае будет недостаточно эффективным, так как оценки на практике являются, как правило, неточными и носят неопределённый характер. В связи с этим для МСА как ОУ необходимо использование интервальных моделей амплитудно-частотных (АЧХ) и амплитудно-фазовых (АФХ) характеристик с интервалом множества.

Примеры построения по результатам эксперимента интервальных АЧХ и АФХ уборочного МСА приведены на рисунках 4 и 5. Различные расчёты и графические построения интервального анализа были осуществлены с использованием универсального математического пакета «MATLAB 5,2», в на-

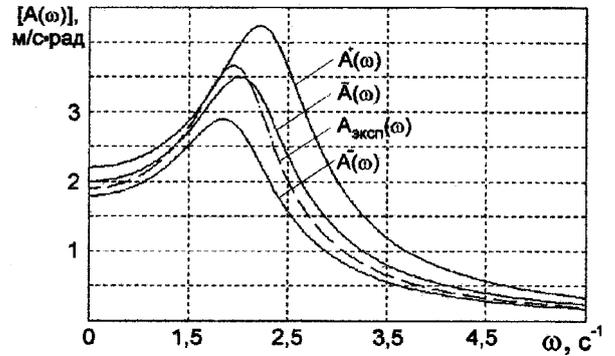


Рис. 4. Интервальная амплитудно-частотная характеристика ОУ:  $A^+(\omega)$ ,  $A^-(\omega)$ ,  $\bar{A}(\omega)$ ,  $A_{\text{эксп}}(\omega)$  – соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АЧХ и экспериментальная, полученная на моделирующем стенде

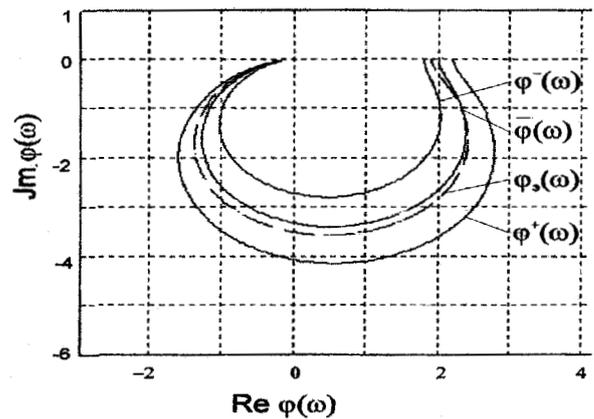


Рис. 5. Интервальная амплитудно-фазовая характеристика ОУ:  $\phi^+(\omega)$ ,  $\phi^-(\omega)$ ,  $\bar{\phi}(\omega)$ ,  $\phi_{\text{э}}(\omega)$  – соответственно верхняя, нижняя границы, среднее значение интервальной АФХ и экспериментальной, полученная на моделирующем стенде

стоящее время предназначенного для проведения сложных инженерных расчётов, аналитического моделирования, а также анализа и синтеза систем управления.

Согласно исследованиям В.Я. Ротача установлено, что существенный эффект автоматизированного управления достигается тогда, когда спектр  $S_{ff}(\omega)$  эквивалентного возмущения находится в низкочастотном диапазоне ( $0 < \omega < \omega_1$ ), где характеристика  $|\Phi_{yf}(j\omega)|^2 \ll 1$ .

Однако, как показал анализ наших экспериментов (применительно к уборочным агрегатам), а также данные других исследователей, диапазон возмущающих воздействий различных МСА включает в себя не только низкочастотный спектр ( $\omega \in [0, \omega_1]$ ) фильтрации возмущающих воздействий, где  $|\Phi_{yf}(j\omega)|^2 < 1$ , но и существенную часть резонансных частот ( $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$ ), где  $|\Phi_{yf}(j\omega)|^2 > 1$ , что не позволяет использовать известный подход минимизации дисперсии выходной величины.

С помощью интервального анализа [14] установлено, что для частотного диапазона возмущений реальных МСА справедливо правило уменьшения

интервала отношения  $\left[ \frac{T_u}{k_{yy}} \right]$  с целью минимизации

значений дисперсии  $[D_y]$ .

Для определения конкретных значений параметров настройки узла управления существуют различные методы, наиболее эффективным из которых является частотный подход с критерием минимизации  $[a_0]^{-1}$ , используемым для оптимизации параметров технических средств управления. Намного упрощается оценка оптимальных параметров настройки с применением известного (для точечной оценки параметров) метода вспомогательной функции  $f$ , на основе которого определены выражения для интервальной  $[f]$  и параметров настройки узла управления.

Рассмотренные интервальные оценки АЧХ и АФХ позволяют проводить анализ устойчивости, качества и синтез СУ с учётом неточностей описания ОУ. Используя такие оценки, можно применять частотные критерии, например, Найквиста, для анализа устойчивости и качества стохастических СУ режимами работы МСА.

Расположением интервальной АФХ разомкнутой системы  $W(j\omega)$  и точки с координатой  $(-1; j0)$  определяют условия критерия устойчивости Найквиста для стохастических систем: замкнутая устойчива, если все точки интервальной оценки не охватывают с координатами  $(-1, j0)$ ; неустойчива, когда все интервальной оценки охватывают с координатами  $(-1, j0)$ ; устойчивость (неустойчивость) этой системы не может быть гарантирована (установить невозможно), если интервальная характеристика проходит через точку с координатами  $(-1, j0)$ .

В последнем случае возникает необходимость уточнения моделей объекта и узла управления для обеспечения выполнения первого и второго условий. Следовательно, использование интервальной

оценки для анализа устойчивости систем может предъявить более жёсткие требования к точности и структуре моделей объекта и узла управления, но при этом гарантировать результат применения частотного критерия. Предлагаемый метод интервального анализа распространяется и на многомерные системы.

Интервальные модели позволяют оценивать возможные значения показателей качества (время регулирования, перерегулирование, статическая ошибка и др.) переходных и установившихся процессов в СУ, а также определять влияние ошибок идентификации ОУ на точность этих показателей, для оценки которых определяют реакцию интервальной модели на входное, например, скачкообразное, гармоническое, ступенчатое псевдослучайное воздействие. При этом строятся верхняя и нижняя границы интервала прогноза на выходную величину ОУ, по которым определяют интервальные оценки показателей качества функционирования СУ МСА.

### Библиографический список

1. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 223 с.
2. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1993. 632 с.
3. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1993. 400 с.
4. Коллатц Л. Функциональный анализ и вычислительная математика. М.: Мир, 1999.
5. Хлебакин Н.А. Аналитический синтез регуляторов в условиях неопределенности параметров объекта управления: Автореф. дис. к.ф-м. н. Л., 1984.
6. Андреев С.А., Петрова Е.А. Разработка алгоритма управления озонатором // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Агроинженерия. 2014. № 2 (62). С. 26–29.
7. Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. О некоторых задачах интервального анализа. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. 52 с.
8. Яненко Н.Н., Шокин Ю.И. Введение в математический анализ. Новосибирск: НГУ, 1999. 91 с.
9. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1996. 293 с.
10. Бахвалов Н.С. Численные методы. Москва: Наука, 2003. 455 с.
11. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1993. 400 с.
12. Moore R.E. Interval analysis. N.Y., Prentice Hall, 1996. 545 с.
13. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On interval-analytic method of sweep (Freiburger Intervall-Berichte). 1980. № 80/10.
14. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On the interval-analytic method for ordinary differential equations (Freiburger Intervall-Berichte). 1982. № 82/5.

**Судник Юрий Александрович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, Тимирязевская, 49; тел.: 8-926-334-89-76; e-mail: sudnikya@mail.ru.

**Андреев Сергей Андреевич** – к.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, Тимирязевская, 49; тел.: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Статья поступила 21.12.2015

## ANALYSIS AND SYNTHESIS OF AUTOMATIC SYSTEMS OF MOBILE AGRICULTURAL UNITS

**Yu.A. SUDNIK, S.A. ANDREYEV**

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

The conventional system of mostly statistical prerequisites (determined input variables, uncorrelated and equally accurate output, the normal law of their distribution) serving as a basis for a classical regression analysis that is widely used to identify control objects, is often not observed in real condition. The paper suggests an interval mathematics apparatus as a new computational method that guarantees the accuracy of the research results in the analysis and synthesis of automatic systems. In the interval mathematics apparatus real (point values) are replaced with interval values. This confirms the scientific novelty of the research topic. The purpose of the latter is to develop a method of interval analysis and synthesis of automatic systems of control objects as exemplified by mobile agricultural units. Research methods and techniques include the experiment, the adoption of a mathematical model of control object (CO), its assessment, the definition of its point and interval parameters, the adequacy and accuracy specifications, and testing the significance of the coefficients and forecasting the CO output signals. The proposed approach allows modelling agricultural machinery as integral dynamic COs and monitoring their design accuracy, which determines the development of effective quality and stability control systems. The authors have developed a method of interval evaluations of amplitude-frequency and amplitude-phase characteristics that provide for the analysis of stability, quality and control system synthesis in view of the CO description inaccuracies.

*Key words:* automatic system, mobile agricultural unit, control object, identification, phase and frequency characteristics, interval arithmetic.

### References

1. Kalmykov S.A., Shokin Yu.I., Yuldashev Z.Kh. Metody interval'nogo analiza [Methods of interval analysis]. Novosibirsk: Nauka, 1986. 223 p.
2. Bakhvalov N.S. Chislennyye metody [Numerical methods]. M.: Nauka, 1993. 632 p.
3. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Raznostnye skhemy [Difference schemes]. M.: Nauka, 1993. 400 p.
4. Kollatts L. Funktsional'nyy analiz i vychislitel'naya matematika [Functional analysis and computational mathematics]. M.: Mir, 1999.
5. Khlebalin N.A. Analiticheskiy sintez regulyatorov v usloviyakh neopredelennosti parametrov ob'ekta upravleniya: Avtoref. dis. k.f-m. n. [Analytical synthesis of regulators in the face of uncertainty parameter of the control object: Self-review of Dis. PhD (Phys-Math)]. L., 1984.
6. Andreyev S.A., Petrova E.A. Razrabotka algoritma upravleniya ozonatorom [Development of ozonizer control algorithm] // Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina". Agroinzheneriya. [Herald of FSEI HPE "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". Agroengineering]. 2014. № 2 (62). P. 26–29.
7. Shokin Yu.I., Yuldashev Z.Kh. O nekotorykh zadachakh interval'nogo analiza. [On some problems of interval analysis]. Novosibirsk: VTs SO AN SSSR, 1982. 52 p.
8. Yanenko N.N., Shokin Yu.I. Vvedenie v matematicheskiy analiz [Introduction to mathematical analysis]. Novosibirsk: NGU, 1999. 91 p.
9. Kalmykov S.A., Shokin Yu.I., Yuldashev Z.Kh. Metody interval'nogo analiza [Methods of interval analysis]. Novosibirsk: Nauka, 1996. 293 p.

10. Bakhvalov N.S. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moskva: Nauka [Science], 2003. 455 p.

11. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Raznostnye skhemy [Difference schemes]. M.: Nauka [Science], 1993. 400 p.

12. Moore R.E. Interval analysis. N.Y., Prentice Hall, 1996. 545 p.

13. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On interval-analytical method of sweep (Freiburger Intervall-Berichte). 1980. № 80/10.

14. Shokin Yu.I., Kalmykov S.A. On the interval-analytical method for ordinary differential equations (Freiburger Intervall-Berichte). 1982. № 82/5.

**Yuri A. Sudnik** – PhD (Eng) – Higher Doctorate, Professor, Head of “Automation and Robotization of Technological Processes” Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-926-334-89-76; e-mail: energo-yaz@mail.ru.

**Sergey A. Andreyev** – PhD (Eng), Associate Professor, Professor of “Automation and Robotization of Technological Processes” Department named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; phone: +7-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

*Received on December 21, 2015*

УДК 631.3:628.8/9

**С.А. АНДРЕЕВ, В.И. ЗАГИНАЙЛОВ, П.Л. МЕЩАНИНОВА**

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ СИЛИКАГЕЛЯ В АДСОРБЦИОННЫХ ОСУШИТЕЛЯХ ВОЗДУХА

Влажность воздуха оказывает значительное влияние на эффективность многих сельскохозяйственных технологических процессов. Вместе с тем поддержание влажности воздуха в заданных пределах является непростой инженерной задачей из-за несовершенства современных осушителей, их высокой стоимости и большой энергоемкости. Целью исследований явилось совершенствование конструкций адсорбционных осушителей посредством изменения режима регенерации силикагеля. Основным отличием разработанных осушителей стала замена используемого в зоне регенерации горячего воздуха на воздух с комнатной температурой, содержащий озон в концентрации 10...50 мг/м<sup>3</sup>. Установлено, что использование озона существенно интенсифицирует процесс регенерации силикагеля, не влияет на технологический процесс и не наносит ущерба окружающей среде. Предложено несколько гипотез, объясняющих механизм интенсифицирующего действия озона. Среди них – гипотеза, связанная с образованием активных центров влаги в газовой фазе и формировании влажностного напора на среде воздух-силикагель, гипотеза об изменении поверхностного натяжения влаги, содержащейся в силикагеле, и гипотеза, основанная на изменении электрических свойств поверхности силикагеля. Приведено описание адсорбционного осушителя воздуха с регенерацией силикагеля в озono-воздушной среде.

*Ключевые слова:* осушение воздуха, адсорбция, регенерации силикагеля, озон, энергозатраты.

Прогрессивным способом повышения эффективности работы водогрейных котлов может стать горение газа в озono-воздушной среде. Известно, что озonoвый наддув снижает затраты газа на 15...20% и улучшает химический состав продуктов сгорания. Озон является нестойким веществом, и его невозможно запастись заблаговременно, поэтому получение озона должно производиться непосред-

ственно в котлах. Для получения озона требуется энергия, и эту энергию необходимо учитывать.

В статье рассмотрены химические реакции горения компонентов природного газа в кислороде и определено необходимое количество кислорода для котлов с тепловой мощностью 7...30 кВт. Высокие окислительные свойства озона, а также некоторые другие его особенности потребовали для горения