УДК 681.513.6

# ПОСТРОЕНИЕ СЕКТОРНОГО УСЛОВИЯ В СИСТЕМЕ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Н.Н. Карабутов**
*Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)*
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78
E-mail: kn22@yandex.ru

**Ключевые слова:** структурная идентификация, модель, нелинейность, структура, секторное условие.

Предложен метод построения секторного условия в системах идентификации нелинейных статических объектов для ряда наиболее часто применяемых нелинейностей. Сектор строится в специальном пространстве, на котором задана статическая структура, отражающая свойства нелинейной системы идентификации. Введен коэффициент когерентности, на основе которого принимается решение о принадлежности рассматриваемой нелинейности сектору.

## CONSTRUCTING A SECTOR CONDITION IN A SYSTEM OF THE STRUCTURE IDENTIFICATION OF NONLINEAR STATIC PLANTS

**N.N. Karabutov**
*Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics, and Automatics (Technical University)*
Russia, 119454, Moscow, Vernadskogo prospect, 78
E-mail: kn22@yandex.ru

**Key words:** structure identification, model, nonlinearity, structure, sector condition.

A method of constructing a sector condition in systems of identification of nonlinear static plants for a number of most frequently used nonlinearities is proposed. The sector is built in a special space, on which a static structure is given, reflecting properties of nonlinear identification system. A coherence coefficient is introduced, based on which the decision on belonging a considered nonlinearity to the sector is made.

## 1. Введение

Для описания нелинейностей на некотором классе функций могут применяться различные способы. Наиболее простой из них – указание для нелинейности области, которой она принадлежит. Для анализа нелинейных динамических систем и синтеза алгоритмов управления используют секторное условие [1, 2]. Как правило, такое представление возможно только в условиях полной априорной определенности. Для систем идентификации динамических объектов в условиях априорной неопределенности способ построения секторного условия был предложен в [3, 4]. Более сложным является введение секторного условия для статических объектов, так как напрямую перенести предложенный подход на статические объекты не удается. Это связано с тем, что выход статического объекта является интегрированной переменной, зависящей от множества входов. В [4, 5] для некоторых классов нелинейностей был предложен способ построения секторного условия, основанного на анализе поля структур и секущих [5].

Ниже изложен способ построения секторного условия (области) на поле структур статической системы, обобщающий результаты [4-7]. Показано, что метод построение указанной области во многом определяется классом рассматриваемых нелинейностей.

## 2. Поле структур статического объекта и сектор для нелинейностей класса $\mathcal{F}_m$

Метод построения секторного условия основан на анализе поля структур на множестве секущих. Понятие поля структур для статического объекта на множестве секущих было введено в [4]. Развитие данного подхода на нелинейные объекты дано в [5, 6]. Приведем понятие поля структур на множестве секущих на примере нелинейностей класса $\mathcal{F}_m$ [6].

Рассмотрим объект

(1) $$y_n = A^{\mathrm{T}}U_n + f(U,n) + \xi_n,$$

(2) $$f(U,n) \in \mathcal{F}_m = \left\{ \begin{array}{c} u_i \in R,\ u_i \in U \mid f : R \times J_N \to R, \\ f(U_n) = \sum_i^m \sum_j^p \alpha_{ij} u_{i,n} u_{j,n},\ i \neq j,\ 1 \leq (m,p) < k \end{array} \right\},$$

где $U_n \in R^k$, $y_n \in R$ — вход и выход объекта, $u_{i,n} \in U_n$ – некоторые функция, обладающие свойством предельной невырожденности, $A \in \Omega_A \subset R^k$ – вектор параметров, принадлежащий ограниченной, но априори неизвестной области $\Omega_A$, $\alpha_{ij}$ – некоторые числа, $n \in J_N$ – дискретное время, $\xi_n \in R$ – ошибка измерения, $\| \xi_n \| < \infty$.

Для (1) известна измерительная информация

(3) $$\mathrm{I}_o = \mathrm{I}_o(y,U) = \{y_n, U_n,\ n \in J_N = [0,N]\}$$

и соответствующее ей отображение $\Gamma_o : \{U_n\} \times \{y_n\}\ \forall n \in J_N$, описывающее наблюдаемый информационный портрет [3].

Необходимо на основе анализа $\mathrm{I}_o$ и $\Gamma_o$ построить область, которая позволяет локализовать нелинейную функцию $f(U,n)$.

Пусть задано сужение наблюдаемого информационного портрета $\Gamma_o^{u_i} \subset \Gamma_o\big|_{u_i \in U}$ $\forall i = \overline{1,k}$ и для каждого $\Gamma_o^{u_i}$ построена секущая

$$\bar{\gamma}(y,u_i) = a_{0,i} + a_{1,i} u_{i,n},$$

где $a_{0,i}$, $a_{1,i}$ — некоторые вещественные числа.

Определены секущие $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)$ для $u_l u_j \in \mathcal{F}_m$

$$\bar{\gamma}(y,u_l,u_j) = a_{0,lj} + a_{1,lj} u_{i,n} u_{j,n}.$$

Введем множество секущих

$$\overline{\Gamma}(U,y) = \{\bar{\gamma}(y,u_i), \bar{\gamma}(y,u_l u_j), i = \overline{1,k},\ (l,j) \geq 1\},$$

заданное на $\mathrm{I}_o$.

*Определение 1.* Полем структур $\mathcal{S}_S$ системы (1), (2) на классе $\mathcal{F}_m$ будем называть совокупность отображений $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)\subset u_l u_j \times y$, $\bar{\gamma}(y,u_i)\subset u_i \times y$ $\forall i=\overline{1,k}$ на евклидовой плоскости $\mathrm{E}$, то есть

$$\mathcal{S}_S(\mathcal{F}_m)=\overline{\Gamma}(U,y).$$

*Теорема 1.* Система (1), (2) имеет линейное поле структур $\mathcal{S}_S(\mathcal{F}_m)$.

Поле структур позволяет упростить анализ структуры системы (1), (2) и оценить как степень линейности (нелинейности) системы через имеющееся множество секущих [7], так и влияние элементов вектора $U\in R^k$ на формирование нелинейной части системы $f(U,n)$. Не менее важным является вопрос локализации функции $f(U,n)$ на основе имеющегося множества измерительной информации $\mathrm{I}_o$. В условия неопределенности решение такой задачи связано с преодолением ряда проблем. Рассмотрим один из подходов, позволяющих локализовать искомую область на основе построения сектора на множестве секущих.

На евклидовой плоскости $(u_i,y)$ отобразим поле секущих $\mathcal{S}_S(\mathcal{F}_m,y)$, где $y$ указывает переменную, для которой строится поле. Рассмотрим сектор $S_{lj}(y)\subset \mathcal{S}_S(\mathcal{F}_m,y)$, ограниченный секущими $\bar{\gamma}(y,u_l)$, $\bar{\gamma}(y,u_j)$. Эти секущие имеют угловые коэффициенты $a_{1,l},a_{1,j}$. Считаем, что $a_{1,l}<a_{1,j}$. На этой же плоскости построим секущую $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)$.

Если окажется, что секущая $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)$ почти для $\forall n\in J$ принадлежит сектору $S_{lj}(y)$, то есть угловой коэффициент $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)$ $a_{1,lj}\in(a_{1,l},a_{1,j})$, то составляющую $u_l u_j\in\mathcal{F}_m$ можно включить в структуру модели объекта (1). Аналогичным образом осуществляется анализ всех кандидатов, априори входящих в функцию $f(U,n)$ в (1).

С каждым элементом $\bar{\gamma}_q\in\overline{\Gamma}(U,y)$, $q=\overline{1,\#\overline{\Gamma}(U,y)}$, где $\#\overline{\Gamma}(U,y)$ — мощность множества $\overline{\Gamma}(U,y)$, будем ассоциировать локальную структуру статического объекта. Обозначим через $r_{\vartheta_q y}$ коэффициент взаимной корреляции между $\vartheta_q$ и $y$.

Если $\bar{\gamma}(y,u_l u_j)\in S_{lj}\subset \mathcal{S}_S(\mathcal{F}_m,y)$, то переменная $u_l u_j$ когерентна с $y$ или имеет связь с $y$ [3, 4]. В этом случае сектор $S_{lj}$ будем называть областью когерентности переменной $u_l u_j$.

Для оценки тесноты связи $u_i u_j$ с $y$ воспользуемся коэффициентом когерентности [4]

$$Q_{ij}=\frac{r_{u_i y}}{r_{u_j y}}.$$

Заметим, что $|Q_{ij}|\le 1$ и, в принципе, должен быть близким к $r_{u_i u_j y}$. Если данное условие не выполняется, то это говорит о некогерентности рассматриваемой составляющей $u_i u_j$.

*Теорема 2* [4]. Если $Q_{ij}=\delta_{ij}$, где $\delta_{ij}\ge\min(r_{u_i y},r_{u_j y})$, и $\delta_{ij}=r_{u_i u_j y}$, то секущая $\bar{\gamma}(y,u_i u_j)\in S_{ij}(y)$.

Итак, метод секущих позволяет проводить анализ структурных свойств статического объекта на основе построения поля структур на классе нелинейностей $\mathcal{F}_m$. Основным достоинством данного подхода является возможность представления структуры объекта на множестве линейных функций (секущих). Анализ $S_S$ позволяет отобрать те элементы из класса $\mathcal{F}_m$, для которых

(4) $$(\min(r_{u_i y}, r_{u_j y}) \le Q_{ij}) \,\&\, (\bar{\gamma}(y, u_l u_j) \in S_{ij}(y)).$$

Заметим, что включение (4) может выполняться не всегда. В этом случае следует от $S_S(\mathcal{F}_m, y)$ перейти к полю $S_S(\mathcal{F}_m, e)$, заданному на множестве $\mathrm{U} \times \mathrm{E}$. Способ получения переменной $e \in R$ для объекта (1) приводится ниже. Множество

$$\mathrm{E} \subseteq \mathrm{I}_e(\mathrm{I}_o) = \{U_n, e_n, n \in J\}$$

содержит информацию о нелинейных свойствах объекта (1).

Изложенный подход остается справедливым также для класса нелинейностей $\mathcal{F}_d$

$$f(U,n) \in \mathcal{F}_d = \left\{ \begin{array}{c} u_i \in R,\, u_i \in U,\, U \in R^k \;|\, f: R \times J_N \to R, \\ f(U_n) = \sum\limits_{l}^{m} \sum\limits_{j}^{p} \alpha_{lj} u_{l,n}^{d_l} u_{j,n}^{d_j},\, l \ne j,\; 1 \le (m,p) < k \end{array} \right\},$$

где $d_j$, $d_l$ – некоторые числа. Пример построения сектора на классе $\mathcal{F}_m$ приведен в [7].

## 3. Секторное условие для нелинейностей класса $\mathcal{F}_s$

Распространим предложенный подход на объект (1) с нелинейностью

$$f(U,n) \in \mathcal{F}_s = \left\{ \begin{array}{c} u_i \in R,\, u_i \in U,\, U \in R^k \,|\, f: R \times J_N \to R, \\ f(u_i, d_i) = \alpha_i u_i^{d_i},\, d_i < \infty,\; \alpha_i < \infty \end{array} \right\}.$$

Покажем, как для класса $\mathcal{F}_s$ получить область когерентности, то есть сектор, которому принадлежит нелинейность $f(U,n) = u_{i,n}^{d_i}$. Дальнейшее изложение основано на методе выпрямления [3, 7]. Суть этого метода состоит в том, чтобы получить секущую информационного портрета (структуры) с максимальным значением коэффициента взаимной корреляции. На классе линейных секущих это возможно только в случае выпрямления информационного портрета.

*Замечание.* 1. В зависимости от решаемой задачи секущая может задаваться не только на классе линейных по входу регрессоров. 2. Как показано в [4], поле структур $S_S(\mathcal{F}_s, y)$ является неинформативным и не позволяет решить задачу построения сектора для данного класса нелинейностей.

Построим поле секущих $S_S(\mathcal{F}_s, e)$ на множестве $\{k_{e,u_i,n}, e_n\}$, где $e_n$ – ошибка прогнозирования выходного сигнала $y_n$ объекта, полученная с помощью модели $\hat{y}_n = \hat{a} s_n$, где $s_n = I^T U_n$, $I \in R^k$ – единичный вектор, $k_{e,u_i}$ – коэффициент структурности

$$k_{e,u_i,n} = k_s(e, u_i, n) = \frac{e_n}{u_{i,n}}.$$

Рассмотрим отображение $\Gamma_e \subset \{k_{e,u_i,n}\} \times \{e_n\}$ и его сужения $\Gamma_e^{k_{e,u_i}}$ $\forall i = \overline{1,k}$. Для каждого $\Gamma_e^{k_{e,u_i}}$ найдем секущую

$$\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}) = \bar{\gamma}_i = a_{e,0}^i + a_{e,1}^i k_{e,u_i}.$$

Соответствующие секущие $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_j,d_j})$ заданы для отображения $\Gamma_e^{k_{e,u_j,d_j}}$

$\forall u_j^{d_j} \in \mathcal{F}_s \ \ (j \geq 1)$

(5) $$\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,d_i}) = \bar{\gamma}_{i,d_i} = a_{e,0,d_i} + a_{e,1,d_i} k_{e,u_i,d_i},$$

где $a_{e,0,d_i}, a_{e,1,d_i}$ – некоторые числа,

$$k_{e,u_i,d_i,n} = k_s(e, u_i, d_i, n) = \frac{e_n}{u_{i,n}^{d_i}}, \ d_i < \infty .$$

Введем множество секущих

$$\overline{\Gamma}(K, e) = \{\overline{\Gamma}(K_e, e), \ \overline{\Gamma}(K_{e,d}, e)\} \ \ \forall e_n \in \mathrm{I}_e ,$$

где $\overline{\Gamma}(K_e, e) = \{\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}), i = \overline{1,k}\}$, $K_e = [k_{e,u_1}, \ldots, k_{e,u_k}]^T$, $k_{e,u_i,d_i} \in K_{e,d}$, $K_{e,d} \in R^q$, $q \leq k$, $\overline{\Gamma}(K_{e,d}, e) = \{\bar{\gamma}(e, k_{e,u_j,d_j}), \ j \geq 1\}$.

Нижнюю границу сектора $S_{d_i}(e) \subset S_S(\mathcal{F}_s, e)$ можно получить из следующего утверждения.

*Теорема 3* [7]. Любая секущая $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}) \in \overline{\Gamma}(K_e, e)$ при $j = i$ ограничивает элемент $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_j,d_j}) \in \overline{\Gamma}(K_{e,d}, e)$ снизу.

Верхнюю границу сектора $S_{d_i}(e)$, которому должна принадлежать секущая $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,d_i})$, на основе анализа множества $\overline{\Gamma}(K_e, e)$ определить не удается. Поэтому к полученному полю структур добавим секущую $\bar{\gamma}(e, k_{e,s_i,d_i})$, где $s_i \in R$, $s_i = I^T(U \setminus u_i)$. Обозначим полученный сектор через

$$S_{d_i}(e) = (\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}), \bar{\gamma}(e, k_{e,s_i,d_i})) .$$

Полную структуру рассматриваемой системы обозначим через $\mathrm{S}_{\overline{\Gamma},\mathcal{F}_s}$

$$\mathrm{S}_{\overline{\Gamma},\mathcal{F}_s} = \overline{\Gamma}(K, e) \cup S_{d_i}(e) .$$

*Теорема 4*. Если $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,d_i}) \subseteq S_{d_i}(e)$, то $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,d_i}) \in \mathrm{S}_{\overline{\Gamma},\mathcal{F}_s}$ $f(U, n) \in \mathcal{F}_s$.

В структуру модели объекта (1) будем включать те функции $f(U, n) \in \mathcal{F}_s$, для которых выполняется условие $r_{k_i e}^2 \leq r_{k_{e,u_i,d_i} e}^2$. Вычисление коэффициента когерентности $Q$ в данном случае приводит к неадекватной оценке связи между $e$ и $u_i^{d_i}$.

Пример построения сектора для объекта (1) с $f(U, n) = 0{,}5 u_{2,n}^{0,3}$ и $A \in R^3$ показан на рис. 1.

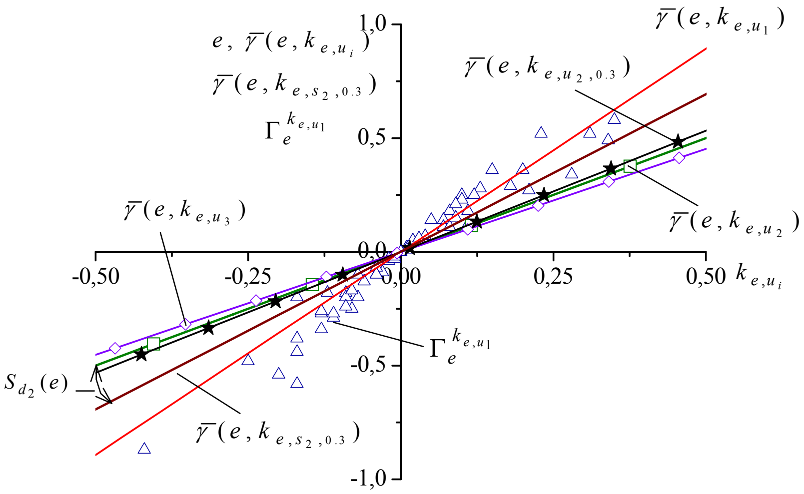


**Рис. 1.** Поле структур системы (1) с $f(U,n) \in \mathcal{F}_s$ .

*Примечание.* Как показано в [6], построение сектора в пространстве $(\mathcal{U},\mathcal{E})$ на множестве случайных входов не представляется возможным. В этом случае на плоскости $(u_i,e)$ в условиях априорной неопределенности более информативной является область в виде прямоугольника, параметры которого нетрудно получить, исходя из характеристик сектора $S_{d_i}(e)$.

Метод выбора параметра $d_i$ функции $f(U,n) \in \mathcal{F}_s$ описан в [7].

## 4. Секторное условие для гистерезисных нелинейностей класса $\mathcal{F}_f$

Изложенный выше подход можно применить для построения секторного условия для функций вида

$$f(U,n) \in \mathcal{F}_f = \left\{ \begin{array}{c} u_i \in R,\, u_i \in U,\; U \in R^k \,|\, f : R \times J_N \to R, \\ f(u_i) = \sum\limits_p c_p u_i^{\alpha_p},\; \alpha_p < \infty,\; i \geq 1 \end{array} \right\}, \tag{6}$$

где $c_p$ – некоторые числа, $\alpha_p \geq 1$.

Необходимо на классе $\mathcal{F}_f$ на основе обработки множества $\mathrm{I}_e = \{U_n, e_n,\, n \in J_N\}$ построить поле структур для объекта (1), (6) и область когерентности для $f(U,n)$.

Для решения задачи воспользуемся подходом, изложенным в разделе 3. Возьмем переменную $u_i$, для которой выполняется условие $r_{u_i e} \geq \delta_e$, где $\delta_e > 0$ — некоторая заданная величина. Построим для $u_i$ отображение $\Gamma_e \subset \{k_{e,u_i,n}\} \times \{e_n\}$ и секущую

$$\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}) = \bar{\gamma}_i = a^i_{e,0} + a^i_{e,1} k_{e,u_i}\,.$$

Рассмотрим функцию $u_i^{\alpha_p}$ и для каждого $\alpha_p \in J_\alpha = [1;\, \overline{\alpha}]$ определим коэффициент структурности $k_{e,u_i,\alpha_p}$, где $J_\alpha \in R$ — некоторый отрезок действительных чисел, выбор которого будет дан ниже. Для каждого $\alpha_p \in J_\alpha$ построим секущую $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,\alpha_p})$ (5) для отображения $\Gamma_e^{k_{e,u_i,\alpha_p}}$. $\alpha_p$ будем изменять до тех пор, пока для коэффициента детерминации секущей $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,\alpha_p})$ будет выполняться условие

$$r^2_{k_{e,u_i,\alpha_p}e} \geq \tilde{\delta}_e, \tag{7}$$

где $\tilde{\delta}_e = \tilde{\delta}_e(\delta_e) > 0$.

Введем множество секущих

$$\overline{\Gamma}(k_{e,u_i,\alpha_p}, e) = \left\{ \bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,\alpha_p}) \ \forall \alpha_p \in J_\alpha \text{ таких, что } r^2_{k_{e,u_i,\alpha_p}e} \geq \tilde{\delta}_e \right\}.$$

Верхняя граница $\bar{\alpha}$ интервала $J_\alpha$ определяется из условия нарушения (7).

Будем называть множество $\overline{\Gamma}(k_{e,u_i,\alpha_p}, e)$ *полем структур* $\mathcal{S}_S(\mathcal{F}_f, \overline{\Gamma}(k_{e,u_i,\alpha_p}, e))$ системы (1), (6), покрывающим нелинейность $f(U,n)$ на классе $\mathcal{F}_f$.

Рассмотрим секущую $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,\alpha_p})$ с показателем $\alpha_p = \bar{\alpha}$ и сектор $S_\alpha(e) = (\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,1}), \bar{\gamma}(e, k_{e,u_i,\bar{\alpha}}))$. Определим коэффициент когерентности $Q_\alpha$ на классе $\mathcal{F}_f$

$$Q_\alpha = \frac{r_{k_{e,u_i,\bar{\alpha}}e}}{r_{k_{e,u_i,1}e}}.$$

По величине $Q_\alpha$ будем судить о принадлежности $f(u_{i,n})$, точнее $\overline{\Gamma}(k_{e,u_i,\alpha_p}, e)$, сектору $S_\alpha(e, \mathcal{F}_f)$. Определим параметр $\bar{\alpha} \in J_\alpha$ из условия нарушения неравенства

$$\left( \max_\alpha r_{u_i^{\alpha_p} e} \geq \delta_e \right) \to \bar{\alpha}.$$

*Теорема 5.* Пусть для объекта (1), (6) построено поле структур $\mathcal{S}_S(\mathcal{F}_f, \overline{\Gamma}(k_{e,u_i,\alpha_p}, e))$. Если выполняется условие $r_{f(u_i),e} \geq Q_\alpha$, то $f(u_{i,n}) \in \mathcal{F}_f$ и является когерентной с $y_n$.

Алгоритм принятия решения относительно нелинейностей класса $\mathcal{F}_s$, $\mathcal{F}_f$, основанный на методе выпрямления, приведен в [7].

## 5. Секторное условие для гистерезисных нелинейностей класса $\mathcal{F}_h$

Рассмотрим объект (1) с нелинейной функцией насыщения $f(u_{i,n}) = f_s(u_{i,n}) = \text{sat}(u_{i,n})$ $(f_s(u_{i,n}) \in \mathcal{F}_{sat} \subset \mathcal{F}_h)$

$$\text{sat}(u_{i,n}) = \begin{cases} \beta, & u_{i,n} \geq \beta, \\ u_{i,n}, & \alpha < u_{i,n} < \beta, \\ \alpha, & u_{i,n} \leq \alpha, \end{cases} \tag{8}$$

где $\alpha, \beta$ — некоторые числа, $\mathcal{F}_h$ — класс статических гистерезисных функций.

Задача, как и выше, сводится к построению сектора, которому принадлежит $f_s(u_{i,n}) \in \mathcal{F}_{sat}$, на основе анализа и обработки множества измерений (3).

Учитывая неинформативность отображения $\Gamma_e \subset \{k_{e,u_i,n}\} \times \{e_n\}$, которому на евклидовой плоскости $(k_{e,u_i,n}, e_n)$ соответствует структура $S_e$, сектор $S_{sat}$ для $f_s(u_{i,n})$ будем строить на основе анализа множества $\mathrm{I}_k^v$. Множество $\mathrm{I}_k^v$ [5, 7] получается следующим образом. Сначала определяется коэффициент структурности $k_{e,u_i,n}$ и формируется множество

$$\mathrm{I}_k = \mathrm{I}_k(e,k) = \{e_n,\ k_n, n \in J_N = [0, N]\},$$

где $k_n = k_{e,u_i,n}$.

Затем значения $k_n$ упорядочиваются по возрастанию на множестве $J_N$. В результате получаем множество $\{k_q^v\}$, где $q \in J_N^v = [0, N]$. Каждому $k_q^v$ соответствует значение $e_q^v$, то есть имеем

$$\mathrm{I}_k^v = \mathrm{I}_k^v(e,k) = \{e_q^v,\ k_q^v,\ q \in J_N^v = [0, N]\}.$$

На множестве $\mathrm{I}_k^v$ построим отображение $\Gamma_e^v : \{k_q^v\} \times \{e_q^v\}$, которому на евклидовой плоскости $(k_q^v, e_q^v)$ соответствует структура $S_{k,e}^v$. Структура $S_{k,e}^v$ несмотря на то, что носит достаточно универсальный характер, отражает особенности, присущие каждому классу нелинейных функций.

Пусть известны фрагменты $(S_\alpha, S_\beta) \subset S_{k,e}^v$, соответствующие области отсечения $f_s(u_{i,n})$. $S_\alpha, S_\beta$ описываются секущими

$$\bar{\gamma}_{\alpha,q} = \bar{\gamma}_\alpha(k_q^v) = a_\alpha k_q^v + b_\alpha,\ \bar{\gamma}_{\beta,q} = \bar{\gamma}(e_q^v, k_q^v) = a_\beta k_q^v + b_\beta,$$

определенными на подмножествах $\mathrm{I}_\alpha \subset \mathrm{I}_k^v$, $\mathrm{I}_\beta \subset \mathrm{I}_k^v$. Используя параметры $\bar{\gamma}_\alpha$ и $\bar{\gamma}_\beta$, построим прямые

$$\chi_{\alpha,q} = \chi_\alpha(k_q^v) = a_\alpha k_q^v + b_\alpha,$$

$$\chi_{\beta,q} = \chi(e_q^v, k_q^v) = a_\beta k_q^v + b_\beta \quad \forall k_q^v \in \mathrm{I}_k^v.$$

Из свойств структуры $S_{k,e}^v$ следует [7], что $a_\alpha < a_\beta$. Образуем множество $S_{sat} = (\chi_\alpha, \chi_\beta)$. Если окажется, что

$$S_{k,e}^v \subset S_{sat} \text{ почти } \forall q \in J_N^v,$$

то $S_{sat} = (\chi_\alpha, \chi_\beta)$ будем называть *сектором* для $f_s(u_{i,n})$.

Для проверки условия $f_s(u_{i,n}) \in S_{sat}$ построим секущую $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}^v)$ для $S_{k,e}^v$

$$\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}^v) = a_{e,0}^v + a_{e,1}^v k_{e,u_i}^v.$$

*Утверждение.* Если $\bar{\gamma}(e, k_{e,u_i}^v) \in S_{sat} = (\chi_\alpha, \chi_\beta)$ почти $\forall q \in J_N^v$, то $f_s(u_{i,n}) \in \mathcal{F}_{sat}$.

Пример построения сектора для объекта (1) с $f(u_{1,n}) = \mathrm{sat}(u_{1,n})$ показан на рис. 2.

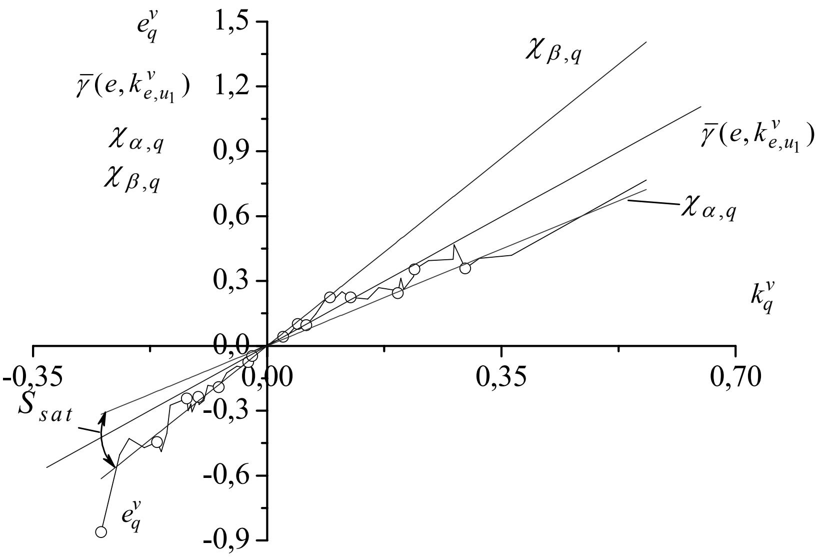


**Рис. 2.** Сектор $S_{sat}$ для объекта (1) с функцией насыщения (8).

Рассмотрим теперь более общий случай, когда $f(u_{i,n}) = f_h(u_{i,n})$ имеет вид

$$f_h(u_{i,n}) = \begin{cases} \left.\begin{array}{c} \beta,\ u_{i,n} \geq \beta_t, \\ u_{i,n},\ \alpha_t < u_{i,n} < \beta_t, \\ \alpha,\ \ u_{i,n} \leq \alpha_t, \end{array}\right\} \Delta u_{i,n} > 0, \\ \left.\begin{array}{c} \beta,\ u_{i,n} + d \geq \beta_b, \\ u_{i,n},\ \alpha_b < u_{i,n} + d < \beta_b, \\ \alpha,\ \ u_{i,n} + d \leq \alpha_b, \end{array}\right\} \Delta u_{i,n} \leq 0, \end{cases} \tag{9}$$

где $f_h(u_{i,n}) \in F_h$, $(\alpha_b, \alpha_t) < \infty$, $(\beta_b, \beta_t) < \infty$, $d > 0$.

Применение структуры $S_{k,e}^v$ для построения сектора для статического гистерезиса (6) в данном случае является недостаточно. Здесь требуется привлечение более тонких методов анализа. Один из подходов, позволяющих построить сектор для $f_h(u_{i,n}) \in F_h$, предложен в [6]. Заметим, что $S_{k,e}^v$, как уже отмечалось выше, носит универсальный характер для таких нелинейностей как функция насыщения, обобщенное реле и статическая функция гистерезиса. Для принятия решения о классе функции необходимо разрабатывать новые критерии и подходы. Один из таких подходов предложен в [8].

## 5. Заключение

Рассмотрены способы построения секторного условия в системах идентификации нелинейных статических объектов в условиях неопределенности на основе анализа измерительной информации. Методы построения области (сектора) существенно зависят от вида нелинейности. На множестве случайных входных сигналов не удается построить указанную область по каналу “вход-выход” объекта, поэтому весь анализ переносится в виртуальную плоскость, которая отражает нелинейные свойства объекта.

# Список литературы


1. Айзерман М.А. Об одной проблеме, касающейся устойчивости «в большом» динамических систем // Успехи математических наук. 1949. Т. 4. С. 186-188.
2. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. М.: Наука, 1977. 248 с.
3. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация систем: анализ информационных структур. М.: УРСС, 2009. 176 с.
4. Karabutov N.N. Selection of the structure of a model in processing the results of measurements in control systems // Measurement Techniques. 2008. Vol. 51. No. 9. P. 960-966.
5. Karabutov N.N. Structures, fields and methods of identification of nonlinear static systems in the conditions of uncertainty // Intelligent Control and Automation. 2010. Vol. 1, No. 2. P. 59-67.
6. Карабутов Н.Н., Карабутов П.Н. Построение секторного условия в системах структурной идентификации на основе обработки измерительной информации // Метрология. 2011. № 5. С. 3-13.
7. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация статических объектов: Поля, структуры, методы. М.: УРСС, 2011. 152 с.
8. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация функции насыщения и идеального реле в статических системах // Моделирование нелинейных процессов и систем. Сборник тезисов второй международной конференцию. М.: Янус – К, 2011. С. 298-299.