Шестаков А.В., Шестопалова О.Л. Автоматическая обработка нечеткой экспертной информации в задаче структурной идентификации моделей изменения временных рядов параметров технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2018. № 4(44).

УДК 004.023:[504.054+504.064.2]

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧЕ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Шестаков А.В.** Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет

**Шестопалова О.Л.**, кандидат технических наук, доцент, декан филиала «Восход» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в г. Байконуре

*В статье описан подход к автоматизации процедуры определения значений структурных параметров моделей изменения временных рядов параметров технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов. Анализируется класс моделей временных рядов типа авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего, а в качестве структурных параметров рассматриваются оценки порядков разностного оператора, оператора авторегрессии и оператора скользящего среднего. При автоматизации идентификации используются экспертные знания о взаимосвязи значений структурных параметров модели временного ряда с особенностями изменения характера зависимости значений его автокорреляционной и частной автокорреляционной функций от величины задержки между сечениями исследуемого процесса. Особенностью предложенного способа решения задачи является применение алгоритмически формализованных процедур обработки экспертных знаний с помощью математического аппарата теории нечетких множеств.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, бортовая аппаратура, временной ряд, прогнозирование, идентификация, нечеткая экспертная информация.

iea.gostinfo.ru

UDC 004.023:[504.054+504.064.2]

# AUTOMATIC PROCESSING OF FUZZY EXPERT INFORMATION IN THE PROBLEM OF STRUCTURAL IDENTIFICATION OF TIME SERIES PARAMETERS MODELS FOR THE CHANGE OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE SPACECRAFTS ONBOARD EQUIPMENT

**Shestakov A.V.** Moscow aviation institute (national research university).
**Shestopalova O.L.,** candidate of technical sciences, associate professor, the dean of a Branch «Voskhod» of the Moscow aviation institute (national research university) in Baikonur.

*The article describes an approach to the automation of the procedure for determining the values of structural parameters of models of changes in time series of parameters of the technical condition of onboard equipment of spacecraft. The class of time series models of the type of autoregression of the integrated moving average is analyzed, and estimates of orders of the difference operator, the autoregression operator and the moving average operator are considered as structural parameters. When automating the identification, expert knowledge is used about the relationship between the values of the structural parameters of the time series model and the peculiarities of changing the nature of the dependence of the values of its autocorrelation and partial autocorrelation functions on the delay between the sections of the process under study. The peculiarity of the proposed method of solving the problem is the use of algorithmically formalized procedures for processing expert knowledge using the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets.*

**Keywords**: spacecraft, onboard equipment, time series, forecasting, identification, fuzzy expert information.

iea.gostinfo.ru

На стадии эксплуатации космических аппаратов (КА) возникает необходимость прогнозирования значений определяющих параметров технического состояния (ТС) составных частей бортовой аппаратуры (БА) КА [2,3,8].

В частности, результаты такого прогнозирования необходимы для обоснования величины остаточного срока службы КА, которая, в свою

очередь, принимается во внимание при формировании решений о восполнении состава орбитальной группировки КА [4-6].

Результаты периодических регулярных измерений параметров технического состояния БА КА представляются в виде временных рядов (ВР) (упорядоченных во времени результатов измерений значений параметров через дискретные равноотстоящие интервалы времени).

Обозначим $\{z_t\}$ $t = 1,2,...,N$ - значения временного ряда результатов телеметрического контроля выходного параметра составной части БА КА;

$N$ - число наблюдений.

Для прогнозирования поведения ВР $\{z_t\}$ во времени необходимо построить соответствующую модель. Пусть изменение во времени выходного параметра составной части БА КА описывается с помощью математической модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) вида [1]:

$$\phi(B)\nabla^d z_t = \theta(B)a_t, \tag{1}$$

где $t = 1,2,...,N$; $N$ - число наблюдений ВР; $\nabla^d$ - оператор взятия разности: $\nabla^0 z_t = z_t$; $\nabla z_t = z_t - z_{t-1} = \omega_t$; $\nabla^2 z_t = \nabla\omega_t, \ldots,$ $B$ - оператор сдвига назад: $Bz_t = z_{t-1}$; $\phi(B), \theta(B)$ - многочлены от $B$ степеней $p$ и $q$, соответственно, вида: $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - ... - \phi_p B^p$, $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - ... - \theta_q B^q$; $a_t$ - последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин с конечной дисперсией (белый шум).

Обозначим разностный временной ряд порядка $d$ как $\omega_t^d$:

$$\omega_t^{(0)} = z_t \tag{2}$$

$$\omega_t^{(1)} = \nabla z_t = z_t - z_{t-1}, \tag{3}$$

$$\omega_t^{(d)} = (1-B)^d z_t = \nabla^d z_t = \nabla\omega_t^{(d-1)} = \omega_t^{(d-1)} - \omega_{t-1}^{(d-1)}, \tag{4}$$

При $d = 0$ модель (1) имеет вид:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + ... + \phi_{p1} z_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - ... - \theta_q a_{t-q} \tag{5}$$

При $d \geq 1$ выражение (4) записывается как:

$$\omega_t^{(d)} = \phi_1 \omega_{t-1}^{(d)} + \phi_2 \omega_{t-2}^{(d)} + ... + \phi_{p1} \omega_{t-p}^{(d)} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - ... - \theta_q a_{t-q}. \tag{6}$$

Выборочная автокорреляционная функция $r_k$ временного ряда изменения во времени выходного параметра составной части БА КА рассчитывается как:



iea.gostinfo.ru

$$r_k = \frac{C_k}{S_\omega^2}, \; k = 1,2,...,K, \tag{7}$$

где $C_k$ - автоковариационная функция:

$$C_k = \frac{1}{N-d} \sum_{t=1}^{N-d-k} (\omega_t^{(d)} - \overline{\omega}^{(d)})(\omega_{t+k}^{(d)} - \overline{\omega}^{(d)}); \tag{8}$$

$S_\omega^2$ - дисперсия временного ряда, определяемая как $S_\omega^2 = C_0$;

$\overline{\omega}^{(d)}$ - среднее значение временного ряда:

$$\overline{\omega}^{(d)} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} z_t, d = 0 \\ \frac{1}{N-d} \sum_{t=1}^{N-d} \omega_t^{(d)}, d \geq 1 \end{cases}. \tag{9}$$

Выборочная частная автокорреляционная функция $\varphi_{kk}$ временного ряда изменения во времени выходного параметра составной части БА КА рассчитывается как [1]:

$$\phi_{kk} = \begin{cases} r_{1,} & k = 1 \\ \dfrac{r_k - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} r_{k-j}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} \phi_{k-1,j} r_j}, & k = 2,3,...,K \end{cases}, \tag{10}$$

где $\phi_{kj} = \phi_{k-1,j} - \phi_{kk}\phi_{k-1,k-j}$, $j = 1,2,...,k-1$.

Задача идентификации структуры модели ВР, принадлежащей классу моделей АРПСС, заключается в получении количественных оценок структурных параметров модели $p, d, q$.

Традиционно идентификация выполняется в два этапа [1]. На первом этапе оценивается значение параметра $d$ (порядка разностного оператора $\nabla^d z_t$). На втором этапе оцениваются значения параметров порядка оператора авторегрессии (АР) $p$ и порядка оператора скользящего среднего (СС) $q$.

При этом используются экспертные знания о взаимосвязи значений структурных параметров $(p, d, q)$ модели АРПСС с особенностями изменения автокорреляционной (АКФ) и частной автокорреляционной функций (ЧАКФ) временного ряда, проявляющихся по мере изменения задержки между сечениями исследуемого процесса.

iea.gostinfo.ru

В частности, в основу оценивания значения порядка разностного оператора $\nabla^d z_t$) положено исследование особенностей изменения автокорреляционной функции рассматриваемого временного ряда. При этом используется тот факт, что, как показано в [1], для нестационарного процесса у автокорреляционной функции отсутствует тенденция к затуханию (не наблюдается ее быстрый спад). Поэтому при оценивании значения порядка разностного оператора $d$ предполагается, что необходимая для получения стационарности степень разности достигнута, если выборочная АКФ ряда $\omega_t^{(d)} = \nabla^d z_t$ быстро затухает. В [1] утверждается что, «на практике $d$ обычно равно 0, 1 или 2, и достаточно просмотреть примерно 20 первых значений автокорреляции исходного ряда, его первых и вторых разностей».

В основу оценивания значений параметров $p^*$ (оценки количественного значения параметра «порядок оператора авторегрессии модели АРПСС») и $q^*$ (оценки количественного значения параметра «порядок оператора скользящего среднего модели АРПСС») положено исследование особенностей совместного изменения автокорреляционной (АКФ) и частной автокорреляционной (ЧАКФ) функций рассматриваемого временного ряда.

При этом используется экспертная информация, приведенная в [1], о том, что:

1. АКФ процесса АР порядка $p$ спадает плавно, а ЧАКФ имеет обрыв после $p$-й задержки;

2. АКФ процесса СС порядка $q$ имеет обрыв после задержки $q$, а ЧАКФ плавно спадает с ростом задержки;

3. АКФ смешанного процесса, содержащего компоненту АР порядка $p$ и компоненту СС порядка $q$, после первых $q-p$ задержек затухает (представляется в виде суммы экспонент и затухающих синусоид);

iea.gostinfo.ru

4. ЧАКФ смешанного процесса, содержащего компоненту АР порядка $p$ и компоненту СС порядка $q$, после первых $p-q$ задержек затухает (представляется в виде суммы экспонент и затухающих синусоид).

До настоящего времени операция определения значений параметров $(p,d,q)$ модели АРПСС по АКФ и ЧАКФ осуществлялась экспертами в ручном режиме, что не позволяло автоматизировать полностью процесс построения модели АРПСС и вносило определенную субъективную неопределенность, так как зависело от знаний и квалификации экспертов.

Автоматизация процедур идентификации структурных параметров модели АРПСС требует введения формализованных способов оценки поведения АКФ и ЧАКФ.

Для формализованной оценки скорости затухания АКФ:

1. Введем $\xi_r$ - коэффициент интенсивности затухания АКФ, определяемый следующим образом:

$$\xi_r = \frac{\sum_{j=1}^{K}(1-|r_k|)}{K} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{K}|r_k|}{K}. \qquad (11)$$

2. Будем оценивать интенсивность затухания АКФ с помощью лингвистической переменной (ЛП) вида [7]:

$$ЛП = \{x, T(x), \Xi, \xi, G, M\}, \qquad (12)$$

где $x$ – название переменной («Интенсивность затухания АКФ»); $T(x)$ – терм-множество переменной $x$, $T(x) = \{T_1(x), T_2(x), T_3(x)\}$, в котором $T_1(x)$ - терм «Слабая интенсивность затухания», $T_2(x)$ - терм «Умеренная интенсивность затухания», $T_3(x)$ - терм «Сильная интенсивность затухания»; $\Xi$ – универсальное множество базовой переменной $\xi$, $\Xi \in [0;1]$; $G$ – синтаксическое правило, порождающее названия $X$ значений ЛП $x$; $M$ – семантическое правило, сопоставляющее $X$ с её смыслом $M(X)$.

Измерение значений ЛП «Интенсивность затухания АКФ» будем проводить с помощью нечеткой лингвистической шкалы (НЛШ), показанной



iea.gostinfo.ru

на рис.1, отличием которой является использование для задания термов $T_j(x),\ j=1,2,3$ функций принадлежности трапециевидного типа.

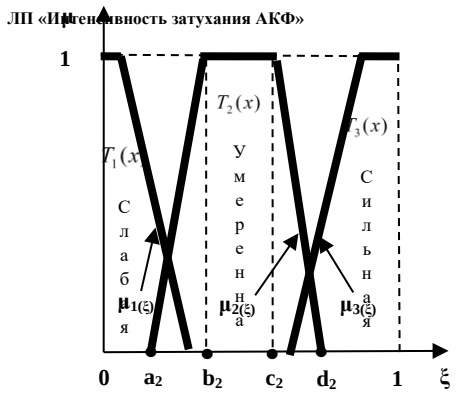


Рис. 1. Пример построения нечеткой лингвистической шкалы измерения ЛП «Интенсивность затухания АКФ»

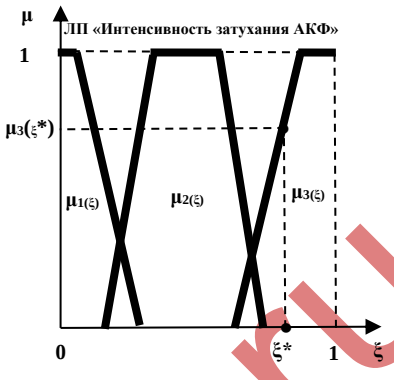


Рис. 2. Оценивание скорости затухания АКФ по нечеткой лингвистической шкале

Согласно рисунку 1, терм-множество $T(x)=\{T_1(x),T_2(x),T_3(x)\}$ состоит из трех термов, каждый из которых задается четверкой параметров[1]: $T_1(x)=(a_1,b_1,c_1,d_1)$, $T_2(x)=(a_2,b_2,c_2,d_2)$, $T_3(x)=(a_3,b_3,c_3,d_3)$. Для случая, показанного на рис. 1, в частности, имеем: $T_1(x)=(0,0,c_1,d_1)$, $T_2(x)=(a_2,b_2,c_2,d_2)$, $T_3(x)=(a_3,b_3,1,1)$.

Аналитическое выражение для функции принадлежности трапециевидного типа можно записать как:

$$\mu_j(\xi)=\begin{cases}0, & \xi\le a_j\\ \dfrac{\xi-a_j}{b_j-a_j}, & a_j\le\xi\le b_j\\ 1, & b_j\le\xi\le c_j\\ \dfrac{d_j-\xi}{d_j-c_j}, & c_j\le\xi\le d_j\\ 0, & d\le\xi\end{cases}. \qquad (13)$$

Подставив рассчитанное по формуле (10) значение $\xi_r$ коэффициента интенсивности затухания АКФ в формулу (12), сравним полученные значения функций принадлежности $\mu_j(\xi_r)$, $j=1,2,3$ и выберем терм НЛШ с наибольшим значением ФП

$$\mu_j^*(\xi_r)=\max(\mu_1(\xi_r),\mu_2(\xi_r),\mu_3(\xi_r)),\ j=\overline{1,3}, \qquad (14)$$

т.е. $T_j^*(x)=T_j(x)\in T(x)\,|\,\mu_j^*(\xi_r)=\max(\mu_1(\xi_r),\mu_2(\xi_r),\mu_3(\xi_r))$.

[1] На рис. 2 с целью экономии обозначены параметры только для одного терма $T_2(x)$.



iea.gostinfo.ru

Для примера, приведенного на рис. 2, имеем:
$T_3^*(x) = T_3(x) \in T(x) \mid \mu_3^*(\xi_r) = \max(0;0;\mu_3(\xi_r))$, т.е. интенсивность затухания АКФ – сильная.

Для формализованного анализа поведения АКФ и ЧАКФ введем вспомогательные параметры $\zeta_k^r$ (для АКФ) и $\zeta_k^\phi$ (для ЧАКФ), определяемые как:

$$\zeta_k^{(r)} = \begin{cases} 1, если \mid r_k \mid \geq \varepsilon, \\ 0, если \mid r_k \mid < \varepsilon \end{cases}; \tag{15}$$

$$\zeta_k^{(\phi)} = \begin{cases} 1, если \mid \phi_{kk} \mid \geq \varepsilon, \\ 0, если \mid \phi_{kk} \mid < \varepsilon \end{cases}, \tag{16}$$

где $\varepsilon$ - заданная достаточно малая пороговая величина.

Введем показатель $o^{(r)}(q)$, отражающий наличие обрыва АКФ после задержки $q$:

$$o^{(r)}(q) = \begin{cases} 1, \text{при } \sum_{k=1}^{q} \zeta_k^{(r)} = q, \ \sum_{k=q+1}^{K} \zeta_k^{(r)} = 0, \\ 0, \qquad \text{в остальных случаях} \end{cases} \tag{17}$$

Аналогично, показатель $o^{(\phi)}(p)$, вычисляемый как:

$$o^{(\phi)}(p) = \begin{cases} 1, \text{при } \sum_{k=1}^{p} \zeta_k^{(\phi)} = p, \ \sum_{k=p+1}^{K} \zeta_k^{(\phi)} = 0, \\ 0, \qquad \text{в остальных случаях} \end{cases}, \tag{18}$$

отражает наличие обрыва ЧАКФ после задержки $p$.

Сформулируем правило проверки наличия плавного затухания АКФ как:

$$o^{(r)}(q) = 0, q = 1,2,...,K, \text{ либо, } o^{(r)}(q) \geq q', \tag{19}$$

т.е. либо на рассматриваемом множестве задержек АКФ спадает без обрывов, либо обрыв происходит не ранее задержки $q'$.

Соответственно, ЧАКФ будет плавно затухать, если

$$o^{(\phi)}(p) = 0, \ p = 1,2,...,K, \text{ либо } o^{(\phi)}(p) \geq p'. \tag{20}$$

Пороговые значения $\varepsilon$, $q'$ и $p'$ на практике рекомендуется назначать следующим образом: $\varepsilon \in [0{,}2;\ 0{,}25]$, $q' = 3$, $p' = 3$.

Теперь можно в таблице 1 в формализованном табличном виде записать систему правил идентификации параметров $p^*$ (оценки количественного значения параметра «порядок оператора авторегрессии модели АРПСС») и $q^*$ (оценки количественного значения параметра «порядок оператора скользящего среднего модели АРПСС»):

iea.gostinfo.ru

Таблица 1

Система правил идентификации параметров $p^*$ и $q^*$

| **АКФ** | **ЧАКФ** | $p^*$ | $q^*$ |
|---|---|---|---|
| $o^{(r)}(1)=1$ | $o^{(\phi)}(p)=0,\ p=1,2,...,K$ , либо $o^{(\phi)}(p)=1, p\geq 3$ | **0** | **1** |
| $o^{(r)}(q)=0,\ q=1,2,...,K$ , либо $o^{(r)}(q)=1, q\geq 3$ | $o^{(\phi)}(1)=1$ | **1** | **0** |
| $o^{(r)}(q)=0,\ q=1,2,...,K$ , либо $o^{(r)}(q)=1, q\geq 3$ | $o^{(\phi)}(p)=0,\ p=1,2,...,K$ , либо $o^{(\phi)}(p)=1, p\geq 3$ | **1** | **1** |
| $o^{(r)}(2)=1$ | $o^{(\phi)}(p)=0,\ p=1,2,...,K$ , либо $o^{(\phi)}(p)=1, p\geq 3$ | **0** | **2** |
| $o^{(r)}(q)=0,\ q=1,2,...,K$ , либо $o^{(r)}(q)=1, q\geq 3$ | $o^{(\phi)}(2)=1$ | **2** | **0** |

Общий алгоритм решения задачи идентификации структуры модели АРПСС приведен на рис. 3.

Частный алгоритм решения подзадачи «Идентификация параметра $d^*$» (блок 2 общего алгоритма) в детализированном виде представлен на рис. 4.

Частный алгоритм решения подзадачи «Исследование поведения АКФ» (блок 3 общего алгоритма) в детализированном виде представлен на рис. 5.

Частный алгоритм решения подзадачи «Исследование поведения ЧАКФ» (блок 4 общего алгоритма) в детализированном виде представлен на рис. 6.

Частный алгоритм решения подзадачи «Идентификация параметров $p^*$ и $q^*$ » (блок 5 общего алгоритма) в детализированном виде представлен на рис. 7.

iea.gostinfo.ru

Рис. 3. Блок-схема общего алгоритма решения задачи идентификации структуры модели АРПСС

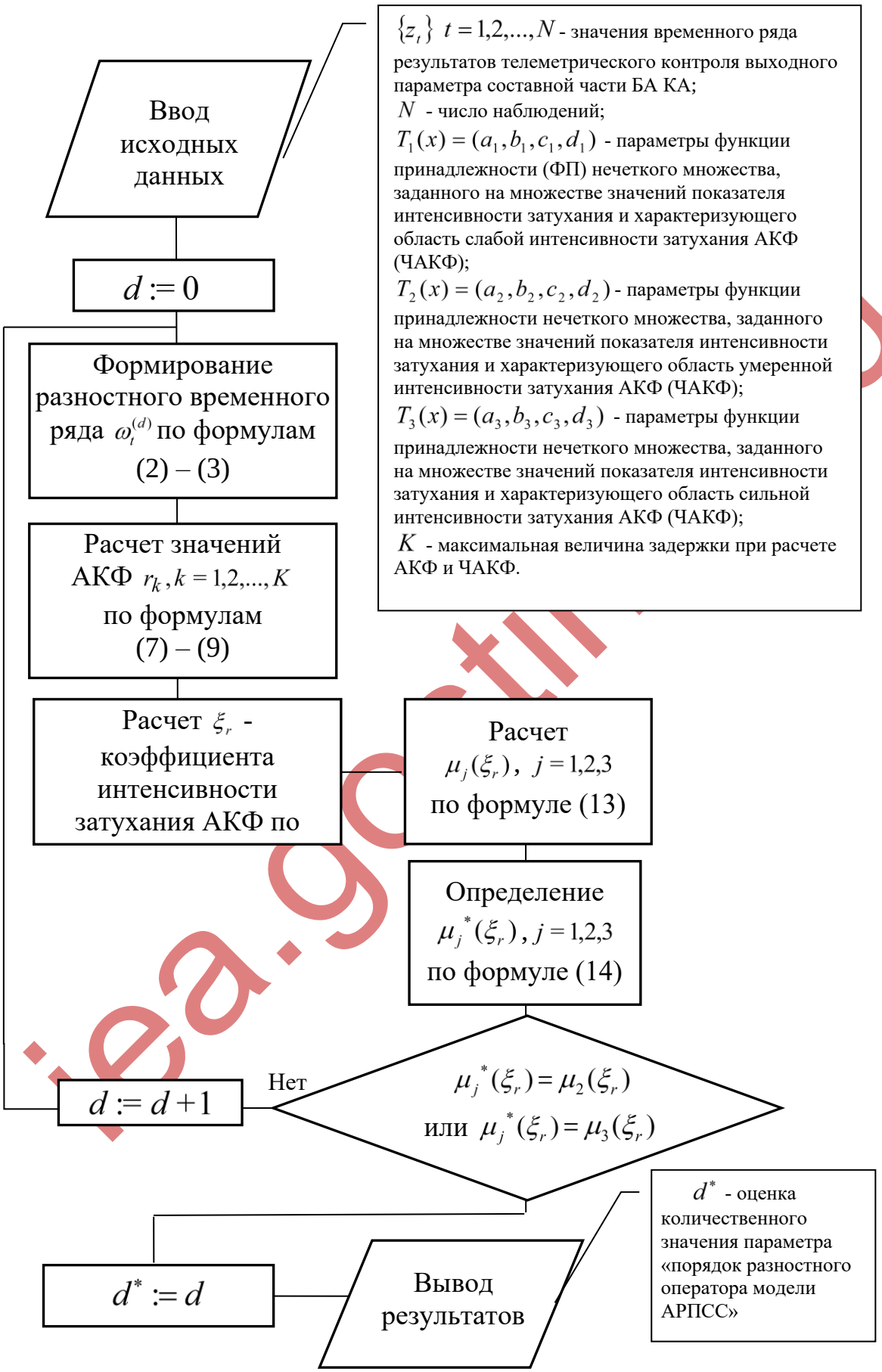


Рис. 4. Блок-схема алгоритма решения подзадачи «Идентификация параметра $d^*$»

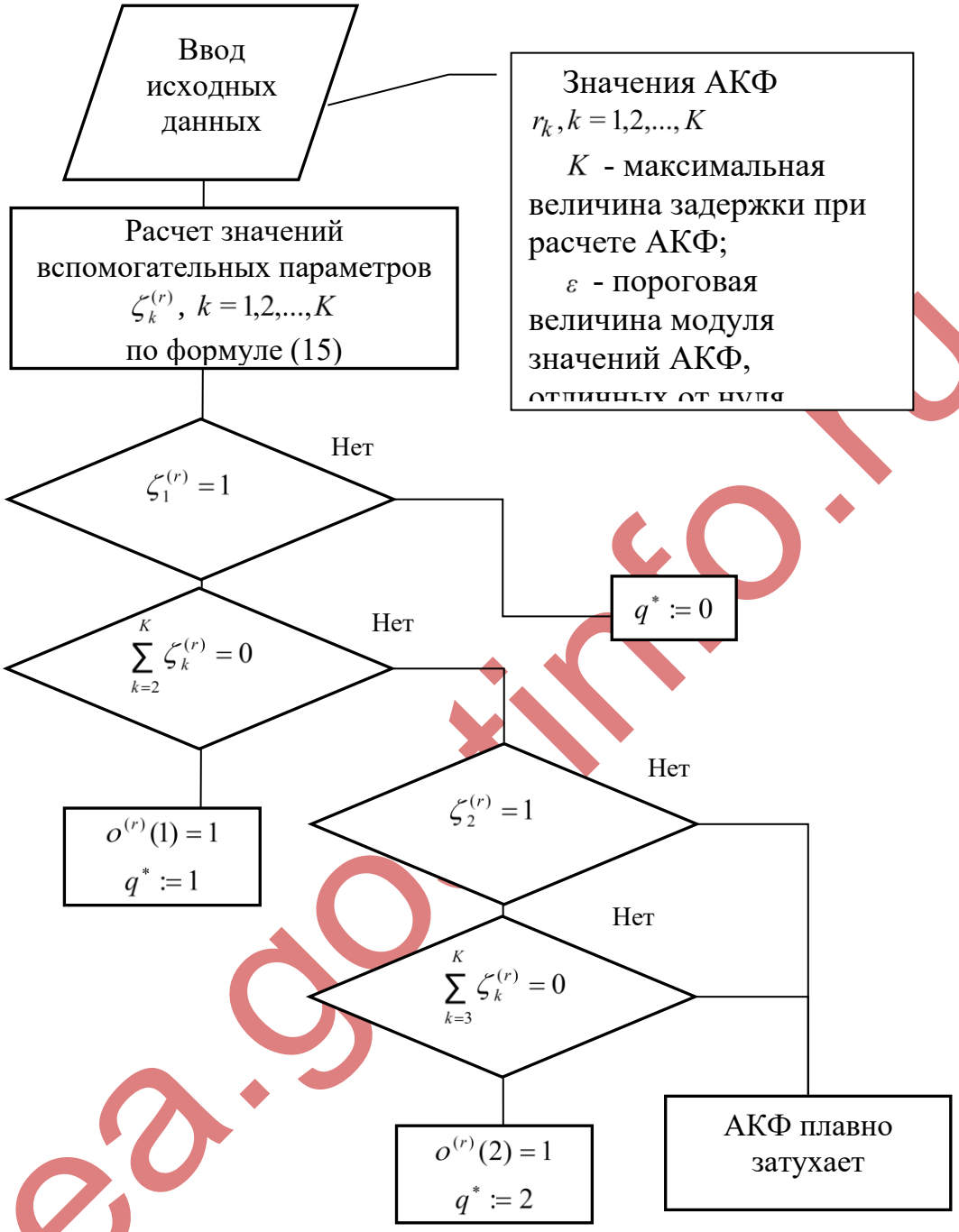


Рис. 5. Блок-схема алгоритма решения подзадачи «Исследование поведения АКФ»

iea.gostinfo.ru

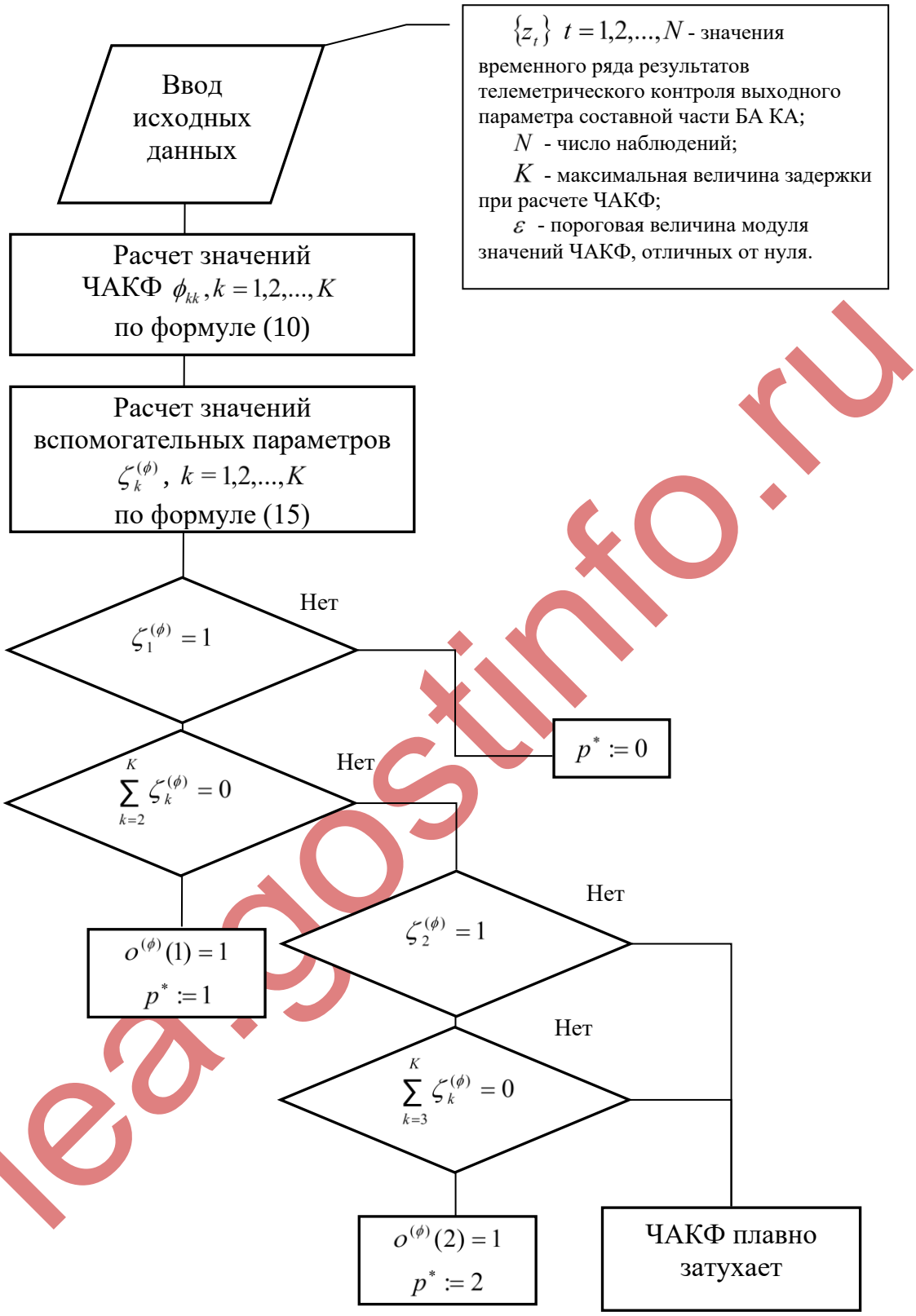


Рис. 6. Блок-схема алгоритма решения подзадачи «Исследование поведения ЧАКФ»

iea.gostinfo.ru

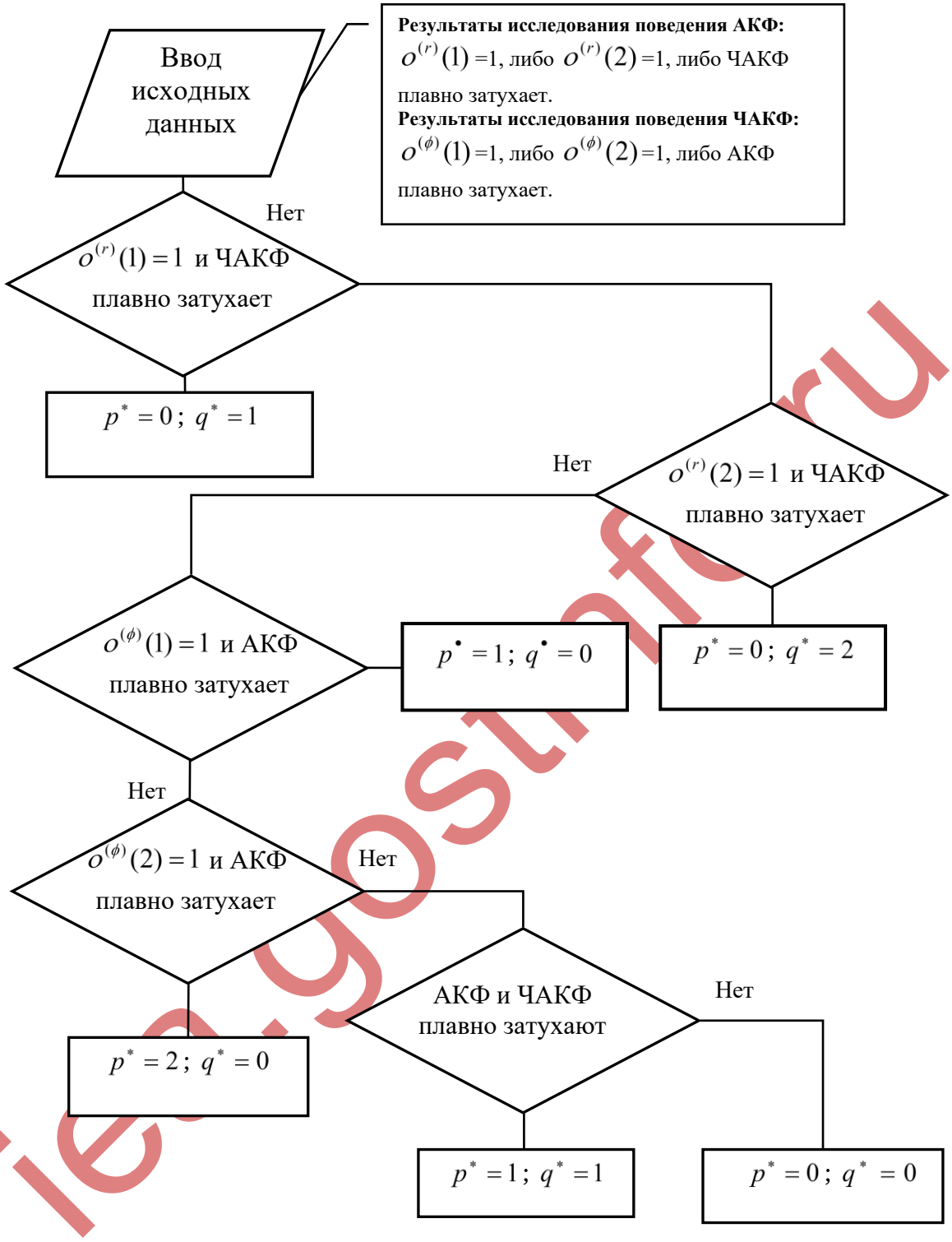


Рис. 7. Блок-схема алгоритма решения подзадачи «Идентификация параметров $p^*$ и $q^*$ »

ies.gostinfo.ru

Приведем пример, иллюстрирующий описанный в статье подход.

Дано: 1. $\{z_t\}$ $t = 1,2,...,226$ - значения исследуемого ВР, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Значения исследуемого временного ряда[2]

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $T^0$ | **26,6** | **27,0** | **27,1** | **27,1** | **27,1** | **27,1** | **26,9** | **26,8** | **26,7** | **26,4** | **26,0** | **25,8** | **25,6** | **25,2** | **25,0** |
| № п/п | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| $T^0$ | **24,6** | **24,2** | **24,0** | **23,7** | **23,4** | **23,1** | **22,9** | **22,8** | **22,7** | **22,6** | **22,4** | **22,2** | **22,0** | **21,8** | **21,4** |
| № п/п | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| $T^0$ | **20,9** | **20,3** | **19,7** | **19,4** | **19,3** | **19,2** | **19,1** | **19,0** | **18,9** | **18,9** | **19,2** | **19,3** | **19,3** | **19,4** | **19,5** |
| № п/п | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| $T^0$ | **19,6** | **19,6** | **19,6** | **19,6** | **19,6** | **19,7** | **19,9** | **20,0** | **20,1** | **20,2** | **20,3** | **20,6** | **21,6** | **21,9** | **21,7** |
| № п/п | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 |
| $T^0$ | **21,3** | **21,2** | **21,4** | **21,7** | **22,2** | **23,0** | **23,8** | **24,6** | **25,1** | **25,6** | **25,8** | **26,1** | **26,3** | **26,3** | **26,2** |
| № п/п | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| $T^0$ | **26,0** | **25,8** | **25,6** | **25,4** | **25,2** | **24,9** | **24,7** | **24,5** | **24,4** | **24,4** | **24,4** | **24,4** | **24,4** | **24,3** | **24,4** |
| № п/п | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 |
| $T^0$ | **24,4** | **24,4** | **24,4** | **24,4** | **24,5** | **24,5** | **24,4** | **24,3** | **24,2** | **24,2** | **24,0** | **23,9** | **23,7** | **23,6** | **23,5** |
| № п/п | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| $T^0$ | **23,5** | **23,5** | **23,5** | **23,5** | **23,7** | **23,8** | **23,8** | **23,9** | **23,9** | **23,8** | **23,7** | **23,6** | **23,4** | **23,2** | **23,0** |
| № п/п | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 |
| $T^0$ | **22,8** | **22,6** | **22,4** | **22,0** | **21,6** | **21,3** | **21,2** | **21,2** | **21,1** | **21,0** | **20,9** | **21,0** | **21,0** | **21,1** | **21,2** |
| № п/п | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 |
| $T^0$ | **21,1** | **20,9** | **20,8** | **20,8** | **20,8** | **20,8** | **20,9** | **20,8** | **20,8** | **20,7** | **20,7** | **20,8** | **20,9** | **21,2** | **21,4** |
| № п/п | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 |
| $T^0$ | **21,7** | **21,8** | **21,9** | **22,2** | **22,5** | **22,8** | **23,1** | **23,4** | **23,8** | **24,1** | **24,6** | **24,9** | **24,9** | **25,1** | **25,0** |
| № п/п | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 |
| $T^0$ | **25,0** | **25,0** | **25,0** | **24,9** | **24,8** | **24,7** | **24,6** | **24,5** | **24,5** | **24,5** | **24,5** | **24,5** | **24,5** | **24,5** | **24,4** |
| № п/п | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 |
| $T^0$ | **24,4** | **24,2** | **24,2** | **24,1** | **24,1** | **24,0** | **24,0** | **24,0** | **23,9** | **23,8** | **23,8** | **23,7** | **23,7** | **23,6** | **23,7** |
| № п/п | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 |
| $T^0$ | **23,6** | **23,6** | **23,6** | **23,5** | **23,5** | **23,4** | **23,3** | **23,3** | **23,3** | **23,4** | **23,4** | **23,3** | **23,2** | **23,3** | **23,3** |
| № п/п | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 |
| $T^0$ | **23,2** | **23,1** | **22,9** | **22,8** | **22,6** | **22,4** | **22,2** | **21,8** | **21,3** | **20,8** | **20,2** | **19,7** | **19,3** | **19,1** | **19,0** |
| № п/п | 226 | | | | | | | | | | | | | | |
| $T^0$ | **18,8** | | | | | | | | | | | | | | |

[2] ВР результатов телеметрического контроля температуры внутреннего контура системы терморегулирования КА

2. $N$ = 226 - число наблюдений;

3. $T_1(x) = (0,\ 0,\ 0.4,\ 0.7)$ - параметры функции принадлежности (ФП) нечеткого множества, заданного на множестве значений показателя интенсивности затухания и характеризующего область слабой интенсивности затухания АКФ (ЧАКФ) (см. рис.9);

4. $T_2(x) = (0.45,\ 0.75,\ 0.83,\ 0.92)$ - параметры функции принадлежности нечеткого множества, заданного на множестве значений показателя интенсивности затухания и характеризующего область умеренной интенсивности затухания АКФ (ЧАКФ) (см. рис.8);

5. $T_3(x) = (0.6,\ 0.88,\ 1,\ 1)$ - параметры функции принадлежности нечеткого множества, заданного на множестве значений показателя интенсивности затухания и характеризующего область сильной интенсивности затухания АКФ (ЧАКФ) (см. рис.8);

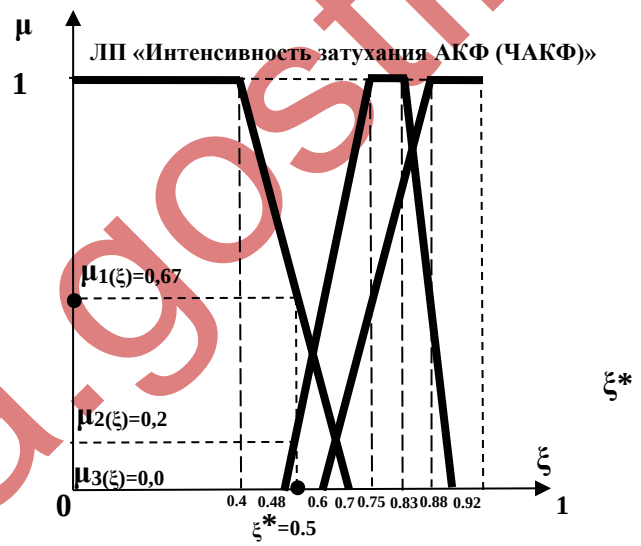


Рис. 8. Оцифрованная нечеткая лингвистическая шкала ЛП «Оценивание скорости затухания АКФ»

6. $K$ =20 - максимальная величина задержки при расчете АКФ и ЧАКФ;

7. $\varepsilon$ =0.2 - пороговая величина модуля значений АКФ и ЧАКФ, отличных от нуля;

8. $q'$ =3 и $p'$ =3 - пороговые значения величин задержек АКФ и ЧАКФ до обрыва, учитываемые при идентификации величины параметров $q^*$ и $p^*$.

iea.gostinfo.ru

*А. Вычисления по алгоритму решения подзадачи «Идентификация параметра $d^*$» (блок 2 общего алгоритма) (рис.4)*

Шаг 1. $d := 0$

Шаг 2. $\omega_t^{(0)} = z_t$

Шаг 3. Расчет значений АКФ $r_k, k = 1,2,...,20$

Шаг 3.1. Расчет среднего значения ВР $z_t$ по формуле (9)

$$\frac{1}{226}\sum_{t=1}^{226} z_t = \frac{1}{226}(26.6 + 27.0 + 27.1 + ... + 18.8) = \frac{5192{,}1}{226} \approx 23{,}0$$

Шаг 3.2. Расчет значений выборочных автокорреляций по формулам (7) и (8):

$$k = 1,\ r_1 = \frac{C_1}{C_0} = \frac{\frac{1}{226}\sum_{t=1}^{225}(z_t - 23{,}0)(z_{t+1} - 23{,}0)}{\frac{1}{226}\sum_{t=1}^{226}(z_t - 23{,}0)^2} =$$

$$= \frac{(26.6 - 23.0)\times(27.0 - 23.3) + (27.0 - 23.0)\times(27.1 - 23.0) + ... + (19.0 - 23.0)(18{,}8 - 23.3)}{(26.6 - 23.0)^2 + (27.0 - 23.3)^2 + (27.1 - 23.0)^2 + ... + (18{,}8 - 23.3)^2} = 0{,}98;$$

$$k = 2,\ r_2 = \frac{C_2}{C_0} = \frac{\frac{1}{226}\sum_{t=1}^{224}(z_t - 23{,}0)(z_{t+2} - 23{,}0)}{\frac{1}{226}\sum_{t=1}^{226}(z_t - 23{,}0)^2} =$$

$$= \frac{(26.6 - 23.0)\times(27.1 - 23.3) + (27.0 - 23.0)\times(27{,}1 - 23.0) + ... + (19.1 - 23.0)\times(18{,}8 - 23.3)}{(26.6 - 23.0)^2 + (27.0 - 23.3)^2 + (27.1 - 23.0)^2 + ... + (18{,}8 - 23.3)^2} = 0{,}94;$$

…

$k = 19$, $r_{19} = 0{,}05$;

$k = 20$, $r_{20} = 0{,}00$.

Результаты расчета значений выборочной АКФ сведены в таблицу 3 и представлены на рис.9.

iea.gostinfo.ru

Таблица 3

Значения оценок выборочной АКФ исследуемого ВР

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r_k$ | **0.98** | **0.94** | **0.90** | **0.85** | **0.80** | **0.75** | **0.69** | **0.64** | **0.58** | **0.52** | **0.47** | **0.41** | **0.36** | **0.30** | **0.25** |
| k | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | |
| $r_k$ | **0.20** | **0.15** | **0.10** | **0.05** | **0.00** | | | | | | | | | | |

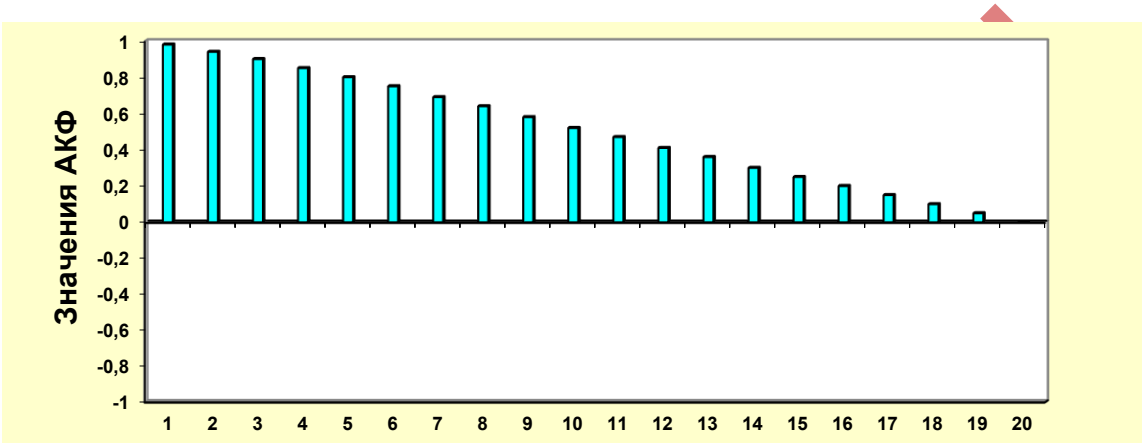


Рис. 9. Значения оценок выборочной АКФ исследуемого ВР $z_t$.

Шаг 4. Расчет $\xi_r$ - коэффициента интенсивности затухания АКФ по формуле (11):

$$\xi_r = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{20} |r_k|}{20} = 1 - \frac{0{,}98 + 0{,}94 + 0{,}90 + \ldots + 0{,}05 + 0{,}00}{20} = 1 - \frac{9{,}94}{20} \approx 0{,}5.$$

Шаг 5. Расчет $\mu_j(\xi_r)$, $j = 1{,}2{,}3$ по формуле (13):

Для $T_1(x) = (0,\ 0,\ 0.4,\ 0.7)$ имеем $\mu_1(\xi_r) = \frac{0.7 - 0.5}{0.7 - 0.4} = \frac{0.2}{0.3} = 0{,}67.$

Для $T_2(x) = (0.45,\ 0.75,\ 0.83,\ 0.92)$ имеем $\mu_2(\xi_r) = \frac{0.5 - 0.45}{0.75 - 0.45} = \frac{0.05}{0.25} = 0{,}2.$

Для $T_3(x) = (0.6,\ 0.88,\ 1,\ 1)$ имеем $\mu_3(\xi_r) = 0{,}0.$

Шаг 6. Определение $\mu_j^*(\xi_r)$, $j = 1{,}2{,}3$ по формуле (14):

$$\mu_j^*(\xi_r) = \max(\mu_1(\xi_r), \mu_2(\xi_r), \mu_3(\xi_r)) = \max(0.67,\ 0.2,\ 0.0) = \mu_1^*(\xi_r)$$

Вывод: интенсивность затухания АКФ - слабая.

Шаг 7. Проверка условия $\mu_j^*(\xi_r) = \mu_2(\xi_r)$ или $\mu_j^*(\xi_r) = \mu_3(\xi_r)$

Шаг 8. Так как условие не выполнено, то $d := d + 1 = 0 + 1 = 1$.

Шаг 9. Формируем разностный временной ряд $\omega_t^{(1)}$ по формуле (3):

$\omega_t^{(1)} = \nabla z_t = z_t - z_{t-1}$:

$\omega_1^{(1)} = z_2 - z_1 = 27.0 - 26.6 = 0.4$;

$\omega_2^{(1)} = z_3 - z_2 = 27.1 - 27.0 = 0.1;$

…

$\omega_{225}^{(1)} = z_{226} - z_{225} = 18.8 - 19.0 = -0.2$

Шаг 10. Производим расчет значений АКФ $r_k, k = 1,2,...,20$ для разностного ВР $\omega_t^{(1)}$. Результаты расчета значений выборочной АКФ для разностного ВР $\omega_t^{(1)}$ сведены в таблицу 4 и представлены на рис. 10.

Таблица 4

Значения оценок выборочной АКФ разностного ВР $\omega_t^{(1)}$

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r_k$ | **0.81** | **0.65** | **0.53** | **0.44** | **0.38** | **0.32** | **0.26** | **0.19** | **0.14** | **0.14** | **0.10** | **0.09** | **0.07** | **0.07** | **0.07** |
| k | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | |
| $r_k$ | **0.07** | **0.09** | **0.05** | **0.04** | **0.04** | | | | | | | | | | |

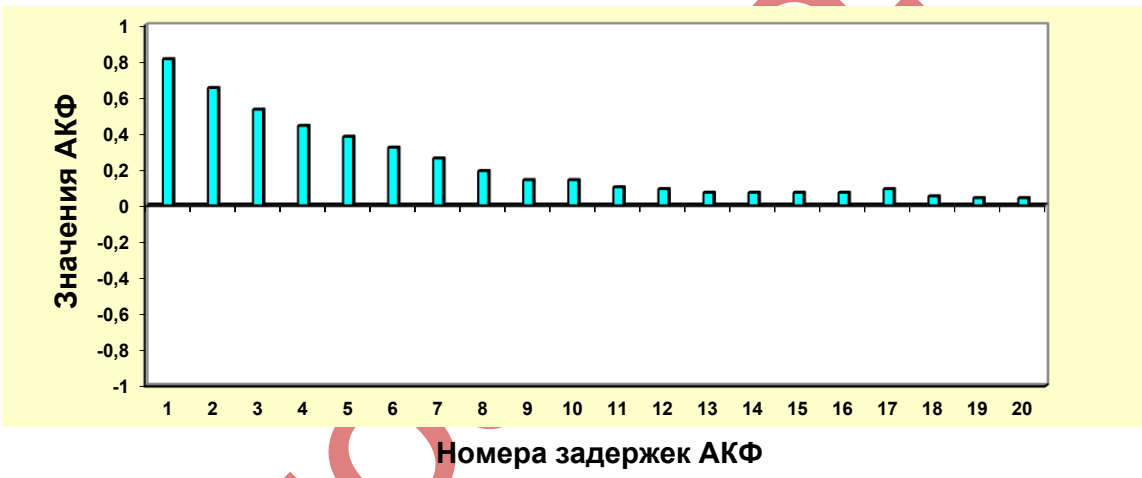


Рис. 10. Значения оценок выборочной АКФ разностного ВР $\omega_t^{(1)}$.

Шаг 11. Производим расчет $\xi_r$ - коэффициента интенсивности затухания выборочной АКФ разностного ВР $\omega_t^{(1)}$ по формуле (11):

$$\xi_r = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{20} |r_k|}{20} = 1 - \frac{0{,}80 + 0{,}65 + 0{,}53 + ... + 0{,}04 + 0{,}04}{20} = 1 - \frac{4{,}54}{20} \approx 0{,}77.$$

Шаг 12. Производим расчет $\mu_j(\xi_r)$, $j = 1,2,3$ по формуле (13):

Для $T_1(x) = (0,\ 0,\ 0.4,\ 0.7)$ имеем $\mu_1(\xi_r) = 0{,}0$.

Для $T_2(x) = (0.45,\ 0.75,\ 0.83,\ 0.92)$ имеем $\mu_2(\xi_r) = 1{,}0$.

Для $T_3(x) = (0.6,\ 0.88,\ 1,\ 1)$ имеем $\mu_3(\xi_r) = \dfrac{0.77 - 0.6}{0.88 - 0.6} = \dfrac{0.17}{0.28} = 0{,}6.$

Шаг 13. Определение $\mu_j^*(\xi_r)$, $j = 1,2,3$ по формуле (14):

$\mu_j^*(\xi_r) = \max(\mu_1(\xi_r), \mu_2(\xi_r), \mu_3(\xi_r)) = \max(0.0,\ 1,.0,\ \ 0.6) = \mu_2^*(\xi_r)$

Вывод: интенсивность затухания АКФ - умеренная.

Шаг 14. Проверка условия $\mu_j^*(\xi_r) = \mu_2(\xi_r)$ или $\mu_j^*(\xi_r) = \mu_3(\xi_r)$

Шаг 15. Так как условие $\mu_j^*(\xi_r) = \mu_2(\xi_r)$ выполнено, то $d^* := 1.$

*Б. Вычисления по алгоритму решения подзадачи ««Исследование поведения АКФ» (блок 3 общего алгоритма) (рис.5)*

Шаг.1. Производится расчет значений вспомогательного параметра $\zeta_k^{(r)}$, $k = 1,2,...,20$ по формуле (15) при $\varepsilon$=0.2. Результаты расчета сведены в таблицу 5 и представлены на рис. 11:

Таблица 5

Значения вспомогательного параметра $\zeta_k^{(r)}$

| **k** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\zeta_k^{(r)}$ | **1,0** | **1,0** | **1,0** | **1,0** | **1,0** | **1,0** | **1,0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** |
| **k** | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | |
| $\zeta_k^{(r)}$ | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | | | | | | | | | | |

Рис. 11. Значения вспомогательного параметра $\zeta_k^{(r)}$.

Шаг 2. Проверяем условие $\zeta_1^{(r)} = 1$.

Шаг 3. Так как условие $\zeta_1^{(r)} = 1$ выполнено, проверяем условие $\sum_{k=2}^{20} \zeta_k^{(r)} = 0$ .

Шаг 4. Так как $\sum_{k=2}^{20} \zeta_k^{(r)} = 10$ , условие $\sum_{k=2}^{20} \zeta_k^{(r)} = 0$ не выполнено, проверяем условие $\zeta_2^{(r)} = 1$.

Шаг. 5. Так как условие $\zeta_2^{(r)} = 1$ выполнено, проверяем условие $\sum_{k=3}^{20} \zeta_k^{(r)} = 0$ .

Шаг 6. Так как $\sum_{k=3}^{20} \zeta_k^{(r)} = 9$ , условие $\sum_{k=3}^{20} \zeta_k^{(r)} = 0$ не выполнено, делаем вывод о том, что «АКФ плавно затухает».

*В. Вычисления по алгоритму решения подзадачи «Исследование поведения ЧАКФ» (блок 4 общего алгоритма) (рис.7)*

Шаг 1. Производится расчет значений ЧАКФ $\phi_{kk}, k = 1,2,..., K$ по формуле (10) для разностного временного ряда $\omega_t^{(1)}$:

$k = 1$, $\phi_{11} = r_1 = 0.81$;

$$k = 2,\ \phi_{22} = \frac{r_2 - r_1^2}{1 - r_1^2} = \frac{0.65 - 0.81^2}{1 - 0.81^2} \approx -0.02;$$

$$k = 3,\ \phi_{33} = \frac{r_3 - \sum_{j=1}^{3-1} \phi_{2,j} r_{3-j}}{1 - \sum_{j=1}^{3-1} \phi_{2,j} r_j} = \frac{r_3 - (\phi_{2,1} r_2 + \phi_{22} r_1)}{1 - (\phi_{2,1} r_1 + \phi_{22} r_2)},$$

где $\phi_{2,1} = \phi_{11} - \phi_{22}\phi_{11} = r_1 - \frac{r_2 - r_1^2}{1 - r_1^2} r_1 = r_1 (1 - \frac{r_2 - r_1^2}{1 - r_1^2})$ =0.81(1+0.01) =0.8181,

$$\phi_{33} = \frac{r_3 - (\phi_{2,1} r_2 + \phi_{22} r_1)}{1 - (\phi_{2,1} r_1 + \phi_{22} r_2)} = \frac{0.53 - (0.8181 \times 0.65 - 0.01774 \times 0.81)}{1 - (0.8181 \times 0.81 - 0.01774 \times 0.65)} \approx 0.02.$$

.

$k = 20$, $\phi_{2020} = 0{,}00$.

Результаты расчета значений выборочной ЧАКФ для разностного ВР $\omega_t^{(1)}$ сведены в таблицу 6 и представлены на рис. 11.

Таблица 6

Значения оценок выборочной ЧАКФ разностного ВР $\omega_t^{(1)}$

| **k** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\varphi_{kk}$ | **0.81** | **-0.02** | **0.02** | **0.06** | **0.03** | **-0.03** | **-0.01** | **-0.08** | **0.00** | **0.10** | **-0.14** | **0.10** | **-0.05** | **0.05** | **0.02** |
| **k** | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | |
| $\varphi_{kk}$ | **0.06** | **0.06** | **-0.17** | **0.09** | **0.00** | | | | | | | | | | |

iea.gostinfo.ru

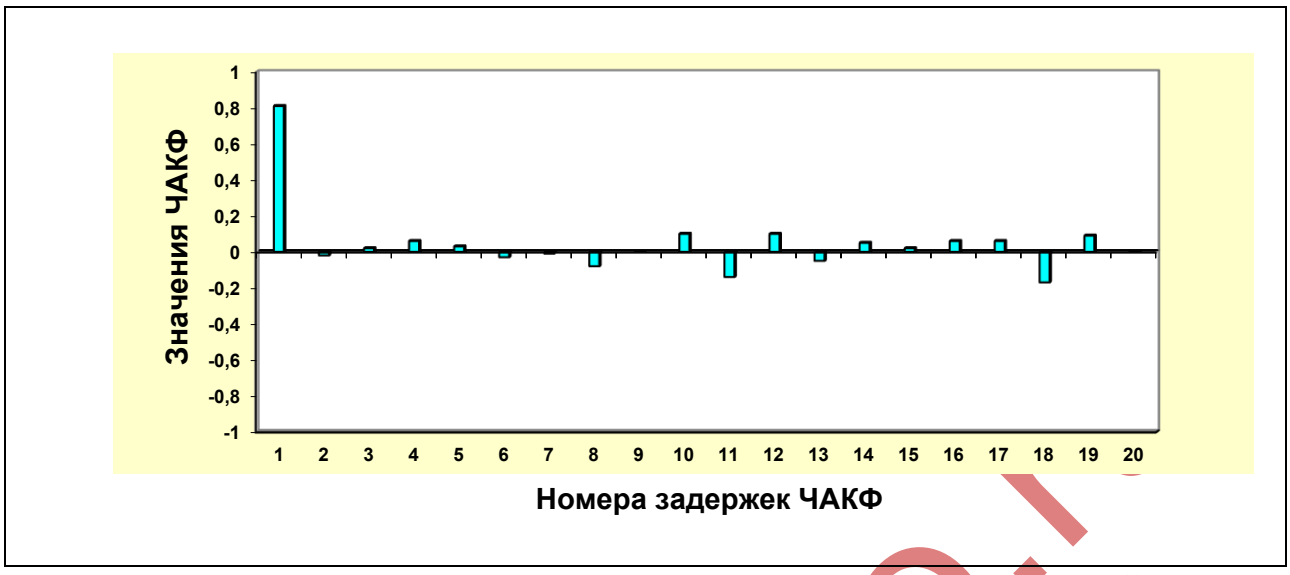


Рис. 12. Значения оценок выборочной ЧАКФ разностного ВР $\omega_t^{(1)}$

Шаг.2. Производится расчет значений вспомогательного параметра $\zeta_k^{(\phi)}$, $k = 1,2,...,20$ по формуле (16) при $\varepsilon$=0.2. Результаты расчета сведены в таблицу 7 и представлены на рис. 13:

Таблица 7

Значения вспомогательного параметра $\zeta_k^{(\phi)}$

| **k** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\zeta_k^{(\phi)}$ | **1,0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** |
| **k** | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | | | | | | |
| $\zeta_k^{(\phi)}$ | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | **0.0** | | | | | | | | | | |

Рис. 13. Значения вспомогательного параметра $\zeta_k^{(\phi)}$.

Шаг 3. Проверяем условие $\zeta_1^{(\phi)} = 1$.

Шаг 4. Так как условие $\zeta_1^{(\phi)} = 1$ выполнено, проверяем условие $\sum_{k=2}^{20} \zeta_k^{(2)} = 0$ .

Шаг 5. Так как условие $\sum_{k=2}^{20} \zeta_k^{(r)} = 0$ выполнено, делаем вывод о том, что $o^{(\phi)}(1) = 1$, т.е. «ЧАКФ обрывается после первой задержки».

*Г. Вычисления по алгоритму решения подзадачи «Идентификация параметров $p^*$ и $q^*$ »(блок 6 общего алгоритма) (рис.8)*

Последовательно проверяем выполнение условий, сформулированных в таблице 2, пока на Шаге 3 не устанавливаем, что одновременно для разностного временного ряда $\omega_t^{(1)}$ имеем $o^{(\phi)}(1) = 1$, т.е. «ЧАКФ обрывается после первой задержки» и «АКФ плавно затухает». Это позволяет сделать вывод о том, что

$$p^* = 1;\ q^* = 0.$$

*Состав выходных данных*

$p^*$ =1 - оценка количественного значения параметра «порядок оператора авторегрессии модели АРПСС»;

$d^*$=1 - оценка количественного значения параметра «порядок разностного оператора модели АРПСС»;

$q^*$ =0 - оценка количественного значения параметра «порядок оператора скользящего среднего модели АРПСС».

Таким образом, в статье изложен разработанный способ автоматической идентификации структурных параметров модели прогнозирования ТС БА КА класса комбинированной авторегрессии - скользящего среднего.

Сущность способа автоматической идентификации структурных параметров модели АРПСС заключается в расчете значений выборочных автокорреляционной и частной автокорреляционной $\phi_{kk}$ функций, оценивании интенсивности их затухания с помощью специально введенных нечетких лингвистических шкал, вспомогательных коэффициентов, а также системы

iea.gostinfo.ru

формализованных правил идентификации структурных параметров модели АРПСС, основанных на экспертных знаниях и позволяющих воспроизвести нечеткую логику специалиста-эксперта при выборе количественных значений структурных параметров модели АРПСС.

## Список использованных источников и литературы

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: Пер. с англ. – Вып. 1. – М.: Мир, 1974. – 408 с.

2. Ломакин М.И., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств // Измерительная техника. – 2014. – № 1, 13 с.

3. Лоскутов А.И., Патраков С.С., Шестопалова О.Л. Интеллектуальная информационно - диагностическая система оценивания технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при подготовке их к запуску// Информационно-управляющие системы, №2 (69), 2014.- С. 18 -24.

4. Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л., Платонов С.А. Исследование вопросов моделирования границ области работоспособности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-13. С. 2815-2818.

5. Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л., Платонов С.А. Определение границ поля допуска параметров бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадии создания при ограниченном объеме информации об условиях эксплуатации // Информация и космос. 2015.№3. С.167-171.

6. Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л., Платонов С.А. Оценивание значений границ поля допуска параметров бортовой аппаратуры космических аппаратов для стадии эксплуатации в условиях информационной неопределённости // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-13. С. 2819-2823.

7. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта /Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с

8. Севастьянов Д.А., Шестопалова О.Л. Пути и методы управления развитием системы информационного обеспечения эксплуатации космических средств // Информация и космос, № 3, 2013.- С. 73 – 76.

© Шестаков А.В.
© Шестопалова О.Л.

iea.gostinfo.ru