

## Раздел II. Системы управления, моделирование и алгоритмы

УДК 621.82

Л.К. Самойлов

### КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*Временные задержки в системе управления можно разделить на три группы: задержки в блоках ввода сигналов датчиков; задержки в модуле реализации алгоритма управления; задержки в блоках вывода сигналов исполнительных устройств. Влияние задержек можно рассматривать с учетом алгоритмов управления и отдельно в цепях прохождения сигналов к модулю реализации алгоритма управления. В статье рассматривается второй подход к оценке влияния задержек. Задержки в модуле реализации алгоритма управления могут суммироваться с задержками сигналов управления в одноименных блоках вывода. Временные задержки сигналов датчиков и исполнительных устройств в блоках системы управления можно или компенсировать, или учитывать их влияние на процессы управления. Существует классический метод компенсации влияния задержек, когда в цепи с задержками устанавливаются дополнительные устройства, называемые экстраполяторами. Экстраполяторы строятся на основе экстраполирующих полиномов, в частности, полинома Лагранжа. Платой за компенсацию влияния задержек являются дополнительные методические и инструментальные погрешности экстраполяторов, которые зависят от порядка используемого полинома. Эти погрешности добавляются к существующим погрешностям цепей системы управления, увеличивая общую погрешность системы. В работе обращается внимание на возможность плавного перехода от классического метода компенсации влияния задержек к методу учета их влияния, который по аналогии называется классическим. Экстраполяторы нулевого порядка представляют собой регистры, которые стоят на входах и выходах модуля реализации алгоритма управления, даже если в системе управления не обращается внимание на задержки сигналов. На основании этого вывода в работе предлагается классический метод учета влияния задержек: задержки считаются равными нулю, но в каждом канале блоков ввода – вывода учитывается дополнительная погрешность, равная погрешности экстраполятора нулевого порядка за время задержки информации данного канала. Полученный результат позволяет проектировать систему управления с исходными данными, в которых учтено влияние задержек. Это исключает необходимость моделирования системы управления с задержками.*

*Системы управления; учет задержек сигналов; экстраполяция нулевого порядка.*

L.K. Samoilov

### CLASSICAL METHOD OF THE ACCOUNT OF INFLUENCE TIME DELAYS OF SIGNALS IN DEVICES OF CONTROL SYSTEMS

*Time delays in a control system can be divided into three groups: delays in blocks of input of signals of gauges; delays in the module of realisation of algorithm of management; delays in blocks of a conclusion of signals of actuation mechanisms. Influence of delays can be considered taking into account algorithms of management and separately in chains of passage of signals to the module of realisation of algorithm of management. In article the second approach to an estimation of influence of delays is considered. Delays in the module of realisation of algorithm of management can be summarised with delays of signals of management in the blocks of a conclusion with the same name. In control system blocks it is possible either to compensate time delays of signals of gauges and actuation mechanisms, or to consider their influence on managerial processes. There is a classical meth-*

of indemnification of influence of delays when in a chain with delays the additional devices named extrapolators are established. Extrapolators are under construction on the basis of extrapolating polynoms, in particular, Lagrange interpolation polynomial. A payment for indemnification of influence of delays are additional methodical and tool errors of extrapolators which depend on an order of a used polynom. These errors are added to existing errors of chains of a control system, increasing the general error of system. In work the attention to possibility of smooth transition from a classical method of indemnification of influence of delays to a method of the account of their influence which by analogy is called as classical is paid. Extrapolators a zero order represent registers which stand on inputs and exits of the module of realisation of algorithm of management even if in a control system the attention to delays of signals is not paid. On the basis of this conclusion in work the classical method of the account of influence of delays is offered: delays are considered equal to zero, but in each channel of blocks of input-output the additional error equal to an error of extrapolators of a zero order during a delay of the information of the given channel is considered. The received result allows to project a control system with initial data in which influence of delays is considered. It excludes necessity of modelling of a control system with delays.

*Control systems; the account of delays of signals; extrapolation of a zero order.*

**Введение.** Современную систему управления на основе последовательной магистральной можно представить (рис. 1) как состоящую из  $n$  датчиков (Д),  $s$  исполнительных устройств (ИУ) и следующих блоков [1, 2]: блок ввода данных; блок вывода данных; блок управления; блок цифрового интерфейса ввода – вывода.

В этих блоках можно выделить: передающую часть блока ввода данных; приемную часть блока ввода данных; модуль реализации алгоритма управления; передающую часть блока вывода данных; приемную часть блока вывода данных.

Приемная часть блока ввода данных и передающая часть блока вывода данных чаще всего объединяются с модулем реализации алгоритма управления.

Состояние объекта управления определяется датчиками. Сигналы датчиков приходят на модуль реализации алгоритма управления с задержками, которые зависят от параметров датчиков, блока ввода данных и программы ввода (опроса) сигналов датчиков [3–5].

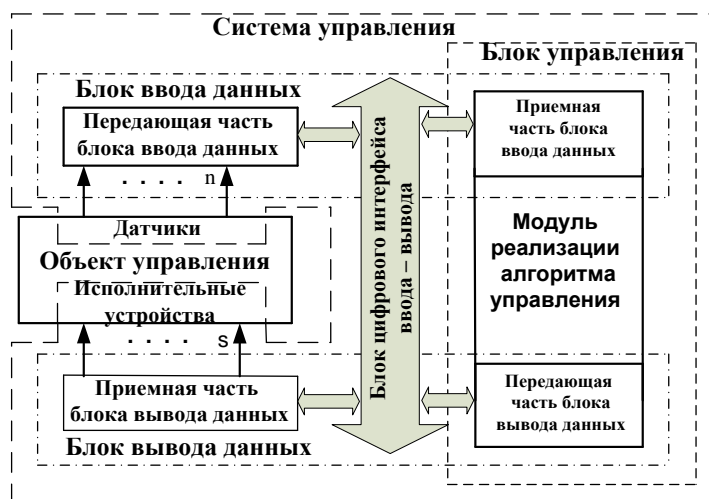


Рис. 1. Структурная схема системы управления и контроля на основе последовательной магистральной

Модуль реализации алгоритма управления выдает сигналы с задержкой, которая определяется алгоритмами управления и скоростью работы вычислительных средств модуля.

Сигналы управления приходят на ИУ после модуля реализации алгоритма управления также с задержками, которые зависят от параметров блока вывода данных и программы вывода сигналов для ИУ [3–5].

Суммарное время задержки системы управления (рис. 1) может быть представлено системой  $n \cdot s$  уравнений (1):

$$t_{\Sigma}^{ij} = t_{\Sigma_{вв}}^i + t_{алг}^j + t_{\Sigma_{выв}}^j . \quad (1)$$

В этой системе уравнений:

$t_{\Sigma}^{ij}$  – суммарное время задержки информации от входа  $i$ -го датчика до выхода  $j$ -го исполнительного устройства;  $t_{\Sigma_{вв}}^i$  – время задержки информации в блоке ввода данных;  $t_{\Sigma_{выв}}^j$  – время задержки информации в блоке вывода данных;  $t_{алг}^j$  – время задержки информации в модуле реализации алгоритма управления.

На рис. 2 в качестве примера показано распределение времен задержек для произвольной системы управления.

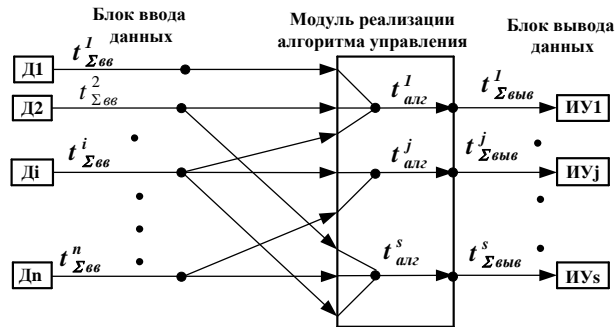


Рис. 2. Распределение времен задержек информации для произвольной системы управления

Структура уравнения (1) отражает тот факт, что каждая из возможных связей  $n$  датчиков с  $s$  исполнительными устройствами имеет собственное время задержки.

Сигналы  $i$ -го датчика и  $j$ -го исполнительного устройства проходят в  $ij$ -х каналах различные временные пути, которые зависят от алгоритмов опроса датчиков, алгоритмов вывода информации для исполнительных устройств, а также от параметров устройств модулей ввода – вывода.

В общем случае модуль реализации алгоритма управления может начать вычисление сигнала управления только после того, как на его вход поступят сигналы всех датчиков.

В системе уравнений (1) величина времени задержки в блоке ввода данных ( $t_{\Sigma_{вв}}^i$ ) имеет постоянную ( $t_{\Sigma_{вв}}^{i\text{noc}}$ ) и переменную ( $t_{\Sigma_{вв}}^{i\text{неп}}$ ) составляющие:

$$t_{\Sigma_{вв}}^i = t_{\Sigma_{вв}}^{i\text{noc}} + t_{\Sigma_{вв}}^{i\text{неп}} , \quad (2)$$

Постоянные составляющие времен задержек каналов блока ввода данных зависят от параметров устройств блока а переменные определяются программой ввода данных. Соответственно, в системе (1) величина времени задержки в модуле выдачи данных ( $t_{\Sigma_{выв}}^j$ ) имеет постоянную ( $t_{\Sigma_{выв}}^{j\text{noc}}$ ) и переменную ( $t_{\Sigma_{выв}}^{j\text{неп}}$ ) составляющие:

$$t_{\Sigma_{выв}}^j = t_{\Sigma_{выв}}^{j\text{noc}} + t_{\Sigma_{выв}}^{j\text{неп}} . \quad (3)$$

Постоянные составляющие времен задержек каналов блока вывода данных зависят от параметров устройств блока, а переменные определяются программой выдачи данных.

Влияние задержек проявляется в том, что когда ИУ начинают воздействовать на объект управления с целью коррекции его состояния, объект уже будет находиться в состоянии, которое, согласно алгоритма управления, требует других воздействий.

В итоге возникает ошибка управления, которая носит динамический характер, т.е. её влияние проявляется при быстрых изменениях состояния объекта во времени.

**Постановка задачи.** Влияние времен задержки сигналов в модулях ввода – вывода на работу систем управления рассматривают с двух позиций:

а) компенсация задержек за счет введения экстраполяторов в модули ввода – вывода;

б) учет влияния задержек на работу алгоритма управления [6–12].

Существующий способ учета влияния задержек состоит в проектировании системы управления без задержки с последующим моделированием разработанной системы с учетом задержки.

Результаты моделирования используются для коррекции алгоритма системы управления или для оценки реальных характеристик [12].

В статье рассматривается второй подход к учету влияния задержек, когда задержка в цепях ввода – вывода считается равной нулю, но погрешность цепей увеличивается на величину, зависящую от времен задержек и скоростей изменения сигналов.

Для обоснования такого подхода к учету задержек предлагается рассматривать его как частный случай компенсации задержек экстраполяторами нулевого порядка.

Предлагаемый способ учета влияния задержек обосновывается тем, что любая система управления на входах и выходах модуля реализации алгоритма управления имеет экстраполяторы нулевого порядка, даже если в системе не планировался режим экстраполяции или в системе не обращают внимание на задержки.

Для показа предлагаемого плавного перехода от компенсации влияния задержек к их учету и для получения численных оценок в статье рассматриваются характеристики существующих экстраполяторов с логически обоснованным переходом к учету влияния задержек.

**Компенсация влияния временных задержек сигналов в устройствах систем управления.** Для исключения влияния временных задержек сигналов в цепях устройств управления можно использовать известный классический прием, который предполагает постановку экстраполяторов (предсказателей) (Э) в цепи с задержкой [13, 14].

На рис. 3 показано размещение экстраполяторов в системе управления для произвольного случая, приведенного на структурной схеме рис. 2.

На рис. 3 введены следующие обозначения:

$\mathcal{E}_{\text{вв}}^i$  – экстраполятор для компенсации времени задержки  $t_{\Sigma\text{вв}}^i + t_{\text{эк}}^i$  в  $i$ -м канале блока ввода данных;  $\mathcal{E}_{\text{выв}}^j$  – экстраполятор для компенсации времени задержки  $t_{\Sigma\text{выв}}^j + t_{\text{алг}}^j + t_{\text{эк}}^j$  в  $j$ -м канале блока вывода данных и модуля реализации алгоритма управления;  $t_{\text{эк}}^i$  – время задержки информации в экстраполяторе блока ввода данных;  $t_{\text{эк}}^j$  – время задержки информации в экстраполяторе блока вывода данных;  $\gamma_{\text{пвв}}^i(p)$  – методическая погрешность экстраполятора  $\mathcal{E}_{\text{вв}}^i$   $p$ -го порядка;  $\gamma_{\text{пвыв}}^j(p)$  – методическая погрешность экстраполятора  $\mathcal{E}_{\text{выв}}^j$   $p$ -го порядка.

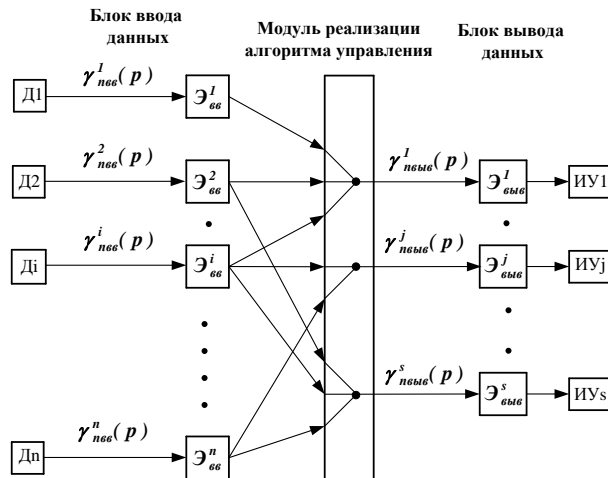


Рис. 3. Структурная схема размещения экстраполяторов для компенсации задержек в произвольной системе управления

На практике чаще всего экстраполяторы проектируются с использованием полинома Лагранжа [14–17].

Пусть имеется непрерывная функция  $U(t)$  и соответствующая ей решетчатая функция  $\psi(t)$ , заданная в  $p+1$  точках  $\psi(t_0), \psi(t_1), \dots, \psi(t_p)$ . В этих точках решетчатая функция  $\psi(t)$  совпадает с непрерывной функцией  $U(t)$ .

Решетчатая функция  $\psi(t)$  получается в результате временной дискретизации непрерывной функции  $U(t)$ .

Процесс получение непрерывной функции  $U_{анп}(t)$  из решетчатой функции  $\psi(t)$  называется восстановлением или аппроксимацией.

Значения непрерывной функции в промежутках между отсчетами решетчатой функции можно аппроксимировать многочленом (полиномом)  $L_i(t)$ , который называется интерполяционной формулой Лагранжа:

$$U_{анп}(t) = \sum_{i=0}^p L_i(t) \cdot \psi(t_i). \tag{4}$$

В формуле (4):  $p$  – порядок полинома;

$$L_i(t) = \begin{cases} \prod_{j=0, j \neq i}^p \frac{t-t_j}{t_i-t_j} & \text{при } p \geq 1 \\ 1 & \text{при } p = 0 \end{cases}. \tag{5}$$

Если решетчатая функция восстанавливается на шаг вперед на участке  $[t_p, t_{p+1}]$ , то восстанавливающее устройство называется экстраполятором.

Абсолютное значение максимальной величины методической погрешности восстановления определяется разностью

$$\Delta U(t) = U(t) - U_{анп}(t). \tag{6}$$

Максимальное значение приведенной методической погрешности восстановления равно

$$\gamma_M^{мак} = \frac{1}{A_0} |\Delta U(t)|_{мак}, \quad (7)$$

где  $A_0$  – максимальное значение сигнала  $U(t)$  или значение амплитуды спектральной плотности сигнала при нулевой частоте.

Если в устройстве цифрового восстановления используется полином Лагранжа, то максимальное значение приведенной методической погрешности для случая экстраполяции определяется как [12, 18]:

$$(\gamma_M^{мак})_{экс} = \frac{1}{A_0} |M_{мак}^{p+1}| \cdot (T_{анп})^{p+1}, \quad (8)$$

где  $T_{анп}$  – интервал аппроксимации;  $M_{мак}^{p+1}$  – максимальное значение  $(p+1)$ -й производной восстанавливаемого сигнала  $i$ -го датчика [20].

Для экстраполяторов  $\mathcal{E}_{вв}^i$  из рис. 3 в качестве  $T_{анп}$  для сигнала  $i$ -го датчика выступают временные интервалы  $T_{анп}^{ивв}$ :

$$T_{анп}^{ивв} = t_{\Sigma вв}^i + t_{эк}^i. \quad (9)$$

Тогда максимальная относительная погрешность экстраполяции, вносимая экстраполяторами на стороне ввода ( $\mathcal{E}_{вв}^i$ ), согласно (8) определится как:

$$\gamma_{ивв}^i(p) = \frac{1}{A_0} |M_{i,мак}^{p+1}| \cdot (T_{анп}^{ивв})^{p+1}, \quad (10)$$

По аналогии для экстраполяторов на стороне вывода ( $\mathcal{E}_{выв}^j$ ), максимальная погрешность определится как:

$$\gamma_{выв}^j(p) = \frac{1}{A_0} |M_{j,мак}^{p+1}| \cdot (T_{анп}^{живв})^{p+1}, \quad (11)$$

где  $M_{j,мак}^{p+1}$  – максимальное значение  $(p+1)$ -й производной сигнала  $j$ -го исполнительного устройства;

$$T_{анп}^{живв} = t_{\Sigma ввыв}^j + t_{алз}^j + t_{эк}^j - \text{интервал экстраполяции.} \quad (12)$$

**Учет влияния временных задержек сигналов в устройствах систем управления.** В соответствии с постановкой задачи, принятой в настоящей работе, если в системе управления нет специально введенных экстраполяторов для компенсации задержек, то необходимо учитывать влияния задержек через дополнительные погрешности в цепях прохождения сигналов.

Продолжим рассуждения, которые проводились при выводе формул (10) и (11).

Для системы управления, изображенной на рис.3, экстраполяторы нулевого порядка ( $p=0$ ) представляют собой или регистры в случае аппаратной реализации или ячейки памяти при программной реализации.

Эти регистры или ячейки памяти всегда имеются на входе и выходе модуля реализации алгоритма управления даже если в системе управления вопрос о компенсации или об учете влияния временных задержек вообще не рассматривается.

Это позволяет утверждать, что в произвольной системе управления влияние задержек на процесс управления можно учесть путем введения погрешностей, которые дают экстраполяторы нулевого порядка, всегда размещенные в цепях прохождения сигналов любой системы управления.

На рис. 4 показаны дополнительные погрешности ( $\gamma^i_{нев}(p=0)$ ,  $\gamma^j_{пвые}(p=0)$ ), которые необходимо добавить к основным погрешностям каналов блока ввода – вывода [20] для учета влияния задержек в этих каналах. Максимальные относительные погрешности, с помощью которых учитываются влияния задержек сигналов, согласно (10), (11) определяются как:

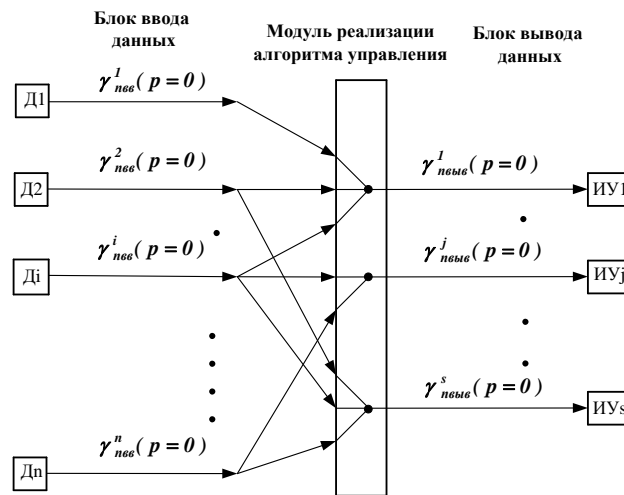


Рис. 4. Распределение дополнительных погрешностей в произвольной системе управления, которые необходимо добавить к основным погрешностям каналов блока ввода – вывода для учета влияния задержек в этих каналах

$$\gamma^i_{нев}(p=0) = \frac{1}{A_0} |M^I_{i.мак}| \cdot (T^{иве}_{анр}), \tag{13}$$

$$\gamma^j_{пвые}(p=0) = \frac{1}{A_0} |M^I_{j.мак}| \cdot (T^{пвые}_{анр}), \tag{14}$$

При использовании средних или среднеквадратических погрешностей в формулы (13), (14) вводится коэффициент риска ( $K_{рк}$ ):

$$|\gamma^i_{нев}(p=0)|_{ср} = \frac{K_{рк}}{A_0} |M^I_{i.мак}| \cdot (T^{иве}_{анр}), \tag{15}$$

$$|\gamma^j_{пвые}(p=0)|_{ср} = \frac{K_{рк}}{A_0} |M^I_{j.мак}| \cdot (T^{пвые}_{анр}), \tag{16}$$

Всегда  $K_{рк} < 1$ .

**Основные выводы.** Временные задержки в цепях блоков системы управления в основном определяются параметрами модулей ввода - вывода, программами ввода сигналов датчиков и программами вывода сигналов исполнительных устройств.

Классическим методом исключения влияния временных задержек в блоках системы управления является постановка экстраполяторов в канал каждого датчика и в канал каждого исполнительного устройства. Но платой за это будут методические и инструментальные погрешности экстраполяторов.

В работе показан переход классического метода исключения влияния временных задержек в классический метод учета влияния временных задержек:

- ◆ в классическом методе исключения влияния временных задержек экстраполяторы нулевого порядка представляют собой регистры;
- ◆ в системе управления на входах и выходах модуля реализации алгоритма управления всегда стоят регистры, вне зависимости от того, обращается внимание в системе на задержки, или нет;
- ◆ тогда можно считать классическим метод учета влияния временных задержек сигналов в системах управления, когда влияние учитывается путем введения в каналы ввода – вывода дополнительных методических погрешностей экстраполяторов нулевого порядка.

Полученный результат позволяет проектировать систему управления с исходными данными, в которых учтено влияние задержек. Это исключает необходимость моделирования системы управления с задержками.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Парк Дж. Маккей С.* Сбор данных в системах контроля и управления: практическое руководство. – М.: ООО «Группа ИТД», 2006. – 504 с.
2. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
3. *Самойлов Л.К.* Алгоритмы работы аналоговых интерфейсов цифровых систем управления и контроля // Известия Высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 5 (168). – С. 66-72.
4. *Самойлов Л.К.* Выбор тактирующей частоты аналоговых интерфейсов цифровых систем управления // Труды конференции «Актуальные проблемы современности: человек, общество, техника» (АПС\_12). – Таганрог, 2012. – Ч. 3. – С. 47-54.
5. *Самойлов Л.К.* Алгоритм оптимизации программы размещения команд опроса датчиков в аналоговом интерфейсе систем управления и контроля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 162-168.
6. *Delphine Bresch-Pietri, Jonathan Chauvin, and Nicolas Petit.* Adaptive control scheme for uncertain time-delay systems // Automatica. – 2012. – No. 48 (8). – P. 1536-1552.
7. *Fridman E.* Stability of systems with uncertain delay: a new complete Lyapunov-Krasovskii Functional // IEEE Transaction on Automatic Control. – 2006. – No. 51. – P. 885-890.
8. *He Y., Wang Q.-G., Lin C., and Wu M.* Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay // Automatica. – 2007. – No. 43. – P. 371-376.
9. *Kao C.Y. and Rantzer A.* Stability analysis of systems with uncertain time-varying delay // Automatica. – 2007. – No. 43. – P. 959-970.
10. *Senname O.* Is a mixed design of observer-controllers for time-delay systems interesting? // Asian Journal of Control. – 2007. – No. 9 (2). – P. 180-189.
11. *Yue D. and Han Q.L.* Delayed feedback control of uncertain systems with time-varying input delay // Automatica. – 2005. – Vol. 41. – P. 233-240.
12. *Крушель Е.Г., Степанченко И.В.* Информационное запаздывание в цифровых системах управления: монография. – Волгоград: ВолГТУ, 2004. – 124 с.
13. *Самойлов Л.К.* Промежуточное восстановление сигналов датчиков в системах управления // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – № 5. – С. 3-15.
14. *Баранов Л.А.* Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
15. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х т. Т. 1. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
16. *Crochiere R.E., Rabiner L.R.* Interpolation and Decimation of digital signals // A Tutorial Review, Proceedings of the IEEE. – March 1981. – Vol. 69, No. 3. – P. 300-332.
17. *Цикин И.А.* Дискретно-аналоговая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.
18. *Самойлов Л.К., Чернов А.М.* Аналитическое представление восстанавливающего оператора при интерполяции по Лагранжу // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 233-236.



19. *Самойлов Л.К.* Обобщенное неравенство Бернштейна для сигналов с протяженным спектром // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – № 3 (Вып. 41).
20. *Самойлов Л.К.* Итерационные алгоритмы выбора частоты дискретизации аналоговых сигналов в цифровых системах управления и контроля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 43-53.

## REFERENCES

1. *Park Dzh. Makkey S.* Sbor dannykh v sistemakh kontrolya i upravleniya; prakticheskoe rukovodstvo [Data collection in the monitoring systems and control: a practical guide]. Moscow: ООО «Группа ИТД», 2006, 504 p.
2. *Denisenko V.V.* Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009, 608 p.
3. *Samoylov L.K.* Algoritmy raboty analogovykh interfeysov tsifrovyykh sistem upravleniya i kontrolya [Algorithms analogue interfaces of digital systems of control and monitoring], *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2012, No. 5 (168), pp. 66-72.
4. *Samoylov L.K.* Vybor taktiruyushchey chastoty analogovykh interfeysov tsifrovyykh sistem upravleniya [The choice of a clock frequency analog interface digital control systems], *Trudy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennosti: chelovek, obshchestvo, tekhnika» (APS\_12)* [Proceedings of the conference "Actual problems of modern man, society, technology" (APS\_12)]. Taganrog, 2012, Part 3, pp. 47-54.
5. *Samoylov L.K.* Algoritm optimizatsii programmy razmeshcheniya komand oprosa datchikov v analogovom interfeyse sistem upravleniya i kontrolya [Algorithm of optimisation of the program of placing of commands of interrogation of sensors in the analogue interface of control and the supervising systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 162-168.
6. *Delphine Bresch-Pietri, Jonathan Chauvin, and Nicolas Petit.* Adaptive control scheme for uncertain time-delay systems, *Automatica*, 2012, No. 48 (8), pp. 1536-1552.
7. *Fridman E.* Stability of systems with uncertain delay: a new complete Lyapunov-Krasovskii Functional, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2006, No. 51, pp. 885-890.
8. *He Y., Wang Q.-G., Lin C., and Wu M.* Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay, *Automatica*, 2007, No. 43, pp. 371-376.
9. *Kao C.Y. and Rantzer A.* Stability analysis of systems with uncertain time-varying delay, *Automatica*, 2007, No. 43, pp. 959-970.
10. *Senane O.* Is a mixed design of observer-controllers for time-delay systems interesting?, *Asian Journal of Control*, 2007, No. 9 (2), pp. 180-189.
11. *Yue D. and Han Q.L.* Delayed feedback control of uncertain systems with time-varying input delay, *Automatica*, 2005, Vol. 41, pp. 233-240.
12. *Krushel' E.G., Stepanchenko I.V.* Informatsionnoe zapazdyvanie v tsifrovyykh sistemakh upravleniya: monografiya [Information delay in digital control systems: monograph]. Volgograd: VolGTU, 2004, 124 p.
13. *Samoylov L.K.* Promezhutochnoe vosstanovlenie signalov datchikov v sistemakh upravleniya [Intermediate recovery of signals of sensors in control systems], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2013, No. 5, pp. 3-15.
14. *Baranov L.A.* Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya [Quantization level and time discretization in digital control systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 304 p.
15. *Maks Zh.* Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh [Methods and technology of signal processing at physical measurements]: in 2 vol. Vol. 1. Moscow: Mir, 1983, 312 p.
16. *Crochiere R.E., Rabiner L.R.* Interpolation and Decimation of digital signals, *A Tutorial Review, Proceedings of the IEEE*, March 1981, Vol. 69, No. 3, pp. 300-332.
17. *Tsikin I.A.* Diskretno-analogovaya obrabotka signalov [Discrete-analog signal processing]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 160 p.

18. *Samoylov L.K., Chernov A.M.* Analiticheskoe predstavlenie vosstanavlivayushchego operatora pri interpolyatsii po Lagranzhu [Analytical presentation restores the operator for Lagrange interpolation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 2 (91), pp. 233-236.
19. *Samoylov L.K.* Obobshchennoe neravenstvo Bernshteyna dlya signalov s protyazhennym spektrom [Generalized Bernstein inequality for signals with wide spectrum], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan state Radiotechnical University], 2012, No. 3 (Issue 41).
20. *Samoylov L.K.* Iteratsionnye algoritmy vybora chastoty diskretizatsii analogovykh signalov v tsifrovyykh sistemakh upravleniya i kontrolya [The iterative algorithms of a determination of analogue signals sampling frequency in the control and the supervising systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 2 (127), pp. 43-53.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Каляев.

**Самойлов Леонтий Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: lksamoilov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371638.

**Samoilov Leonty Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: lksamoilov@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371638.

УДК 681.51

**А.Б. Чернышев, О.И. Атрошенко**

### **СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ХИЩНИК–ЖЕРТВА» И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ**

*Рассмотрено применение метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов по заданным инвариантным многообразиям синергетического подхода в теории управления к задаче синтеза законов управления популяционными процессами в экологической системе «хищник–жертва». Задача управления системой «хищник–жертва» состоит в синтезе таких законов управления, которые обеспечивают поддержание заданного количества жертв или хищников и отражают естественный характер их поведения. Популяционные процессы в системе «хищник–жертва» описываются моделями Вольтерра–Лотки. Экологическая модель «хищник–жертва» описывает динамику численности популяций в экологической системе. Сущность синергетического подхода в теории управления заключается в направленной самоорганизации динамических систем, путем искусственного конструирования аттракторов в их фазовом пространстве. Введены желаемые инвариантные многообразия (макропеременные) – экологические аттракторы в соответствии с целью управления, к которым притягиваются все траектории системы. Приведены уравнения движения системы, которые определяют динамику на инвариантном многообразии – желаемое количество популяции жертв. Составлены программы в пакете программ Maple 2015.0, позволяющие моделировать замкнутые системы управления, получены графики переходных процессов замкнутых систем, построены фазовые траектории, изображающие точки которых, стартуя из произвольных начальных условий, попадают на инвариантное многообразие. Аналитически синтезированы законы управления, переводящие систему на заданные инвариантные многообразия для моделей системы «хищник–жертва».*

*Модель Вольтерра–Лотки; система «хищник–жертва»; синтез; закон управления; аттрактор; фазовый портрет; система управления.*