

УДК 539.143.43:[681.5+637.07]

## ОЦЕНКА НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МОЛОКА МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

<sup>1</sup>Айтчанов Б.Х., <sup>2</sup>Алдибекова А.Н.

<sup>1</sup>Университет имени Сулеймана Демиреля, Алматы, e-mail: bekait@rambler.ru;

<sup>2</sup>Алматинский технологический университет, Алматы, e-mail: aitkul\_86@mail.ru

В данной статье рассматривается система управления качеством молока при его обработке магнитным полем, использующего метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Разработана трехуровневая автоматизированная система управления, состоящая из системы омагничивания молока, системы контроля качества молока с ЯМР-датчиком, частотно-импульсной системы стабилизации (ЧИСС) напряженности магнитного поля. В работе особое внимание уделяется параметрическому синтезу ЧИСС напряженности магнитного поля, включающему предварительное структурное преобразование динамического частотно-импульсного модулятора, формирование математических моделей системы и оценку оптимальных настроечных параметров ЧИСС напряженности магнитного поля. Фильтр частотно-импульсного модулятора ЧИСС реализован в виде аperiodического звена 2 порядка. Математические модели ЧИСС напряженности магнитного поля построены в классе функциональных рядов Вольтерра. Полученные в работе нелинейные и статистически линеаризованные математические модели частотно-импульсной системы стабилизации ЧИСС напряженности магнитного поля позволили оценить настроечные параметры системы, а также служат основой для построения математических моделей динамической частотно-импульсной системы управления производством и качества молочной продукции, которые позволяют в дальнейшем разработать различные по точности и трудоемкости вычислительных процедур методы анализа и синтеза данного класса систем управления.

**Ключевые слова:** частотно-импульсный модулятор, математическая модель, контроль качества, магнитная обработка

## ESTIMATION OF THE ADJUSTMENT PARAMETERS OF THE FREQUENCY-IMPULSE STABILIZATION SYSTEM (FISS) OF THE MAGNETIC FIELDS TENSIONS IN THE PROCESSING OF MILK BASED ON METHOD OF THE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

<sup>1</sup>Aytchanov B.Kh., <sup>2</sup>Aldibekova A.N.

<sup>1</sup>Suleyman Demirel University, Almaty, e-mail: bekait@rambler.ru;

<sup>2</sup>Almaty Technological University, Almaty, e-mail: aitkul\_86@mail.ru

This article deals to the milk's quality control system when its processing by usage nuclear magnetic resonance (NMR) method. There was developed a three-level automated control system, which consist of the milk demagnetization system, a quality control system with an NMR sensor, a frequency-pulse stabilization system (FPSS) of the magnetic fields tensions. In this work, special attention is paid to the parametric synthesis of the FISS of the magnetic fields tensions, including the preliminary structural transformation of the dynamic frequency-pulse modulator, forming of the mathematical models of the system and estimation of the tuning parameters of the FISS of the magnetic fields tensions. The filter of the frequency-pulse modulator FISS is realized in the form of the 2-order aperiodic link. Obtained in the work nonlinear and static linearized mathematical models of the frequency-pulse system stabilization FISS of the magnetic fields tensions made it possible to estimate of the tuning parameters of the system, and also use it for constructing mathematical models of the dynamic frequency-pulse production control system and quality of the milks products on the accuracy and laboriousness of computational procedures for the methods of the analysis and synthesis in this control systems class.

**Keywords:** frequency-pulse modulator, mathematical model, quality control, magnetic processing

Одним из путей повышения качества молочной продукции является создание инновационных методов контроля и управления, т.е. создание автоматизированных систем управления технологическими процессами производства молока.

Для достижения этой цели в работе [1] предложена трехуровневая система, состоящая из системы омагничивания молока; системы контроля качества молока с датчиком, использующим метод

ядерного магнитного резонанса (ЯМР); частотно-импульсной системы стабилизации (ЧИСС) напряженности магнитного поля.

Система омагничивания молока обеспечивает улучшение качественных характеристик молока за счет применения метода ядерного магнитного резонанса ЯМР. Аппарат электромагнитной обработки молока, принцип его работы и блок-схема системы представлены в работе [1].

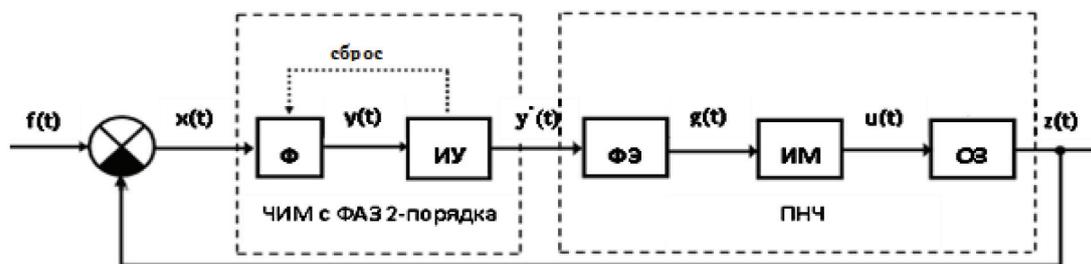


Рис. 1. Структурная схема ЧИСС напряженности магнитного поля

Система контроля качества молока основана на использовании датчиков ЯМР, которая позволяет с высокой степенью точности контролировать качество выпускаемой продукции и обнаружить любую химическую подделку.

В настоящей работе рассматривается частотно-импульсная система стабилизации (ЧИСС) напряженности магнитного поля, функционирующей аналогично системе, приведенной в [2].

ЧИСС индукции (напряженности) магнитного поля – замкнутая система, состоящая из  $\Sigma$ -частотно-импульсного модулятора с фильтром в виде аperiodического звена (ФАЗ) 2-го порядка и приведенной непрерывной части (ПНЧ), структурная схема системы приведена на рис. 1.

На входе системы действует стационарный нормальный случайный процесс  $f(t)$  с корреляционной функцией с известной корреляционной функцией  $R_f(\tau) = \sigma_f^2 e^{-\alpha|\tau|}$ .

Приведенная непрерывная часть ПНЧ состоит из последовательного соединения управляемого объекта с запаздыванием, исполнительного механизма (ИМ) и формирующего элемента (ФЭ), задающего требуемую форму управляющих импульсов.

В общем случае ПНЧ характеризуется как нелинейная динамическая система со случайными параметрами и представима некоторым функциональным уравнением следующего вида [3, 4]:

$$z(t) = H[\lambda, \tau_0, z(\tau), g(\tau)/t_0 \leq \tau \leq t], \quad (1)$$

где  $H$  – непрерывный нелинейный функционал; параметр  $\lambda$  характеризует случайность параметров функционала  $H$ ;  $g(t)$  – последовательность управляющих случайных импульсов заданной формы;  $\tau_0$  – время запаздывания управляемого объекта с запаздыванием (ОЗ) [5].

$\Sigma$  – частотно-импульсный модулятор ( $\Sigma$ -ЧИМ) второго порядка представляет собой последовательное соединение фильтра (Ф), реализованного в виде аperiodического

звена 2-го порядка и импульсного устройства ИУ (рис. 1).

В фильтре осуществляется некоторое динамическое преобразование непрерывного процесса  $x(t)$  в сигнал  $y(t)$ . Импульсное устройство ИУ генерирует единичный  $\delta$ -импульс в тот момент времени, когда выходной сигнал фильтра  $\Phi$  достигает порогового значения  $\Delta$  и осуществляет обнуление всех накопителей энергии, которые входят в состав фильтра (осуществляется операция сброса). Уравнение движения  $\Sigma$ -частотно-импульсного модулятора второго порядка состоит из уравнения движения фильтра  $\Phi$  и уравнений, определяющих моменты появления и знак импульсов, и операции сброса.

Фильтр  $\Sigma$ -ЧИМ второго порядка, описывается в виде аperiodического звена 2-го порядка передаточной функцией

$$D(p) = \frac{k}{(p + \alpha_1)(p + \alpha_2)} = k_\Phi \left( \frac{1}{p + \alpha_2} - \frac{1}{p + \alpha_1} \right), \quad (2)$$

где  $k_\Phi = \frac{k}{\alpha_2 - \alpha_1}$  – коэффициент усиления аperiodического звена 2-го порядка, а  $\alpha_1, \alpha_2$  – время инерционности.

Содержательное описание и математическая формулировка задачи параметрического синтеза ЧИСС индукции (напряженности) магнитного поля даны соответственно в [1] и [2].

Процедура параметрического синтеза ЧИСС индукции (напряженности) магнитного поля состоит из трех этапов:

1. Структурное преобразование  $\Sigma$ -ЧИМ 2-го порядка, т.е. построение структурной модели, нелинейной эквивалентной исходному модулятору системы;

2. На основе структурной модели разработка нелинейных моделей в классе рядов Вольтерра и статистически линеаризованных моделей.

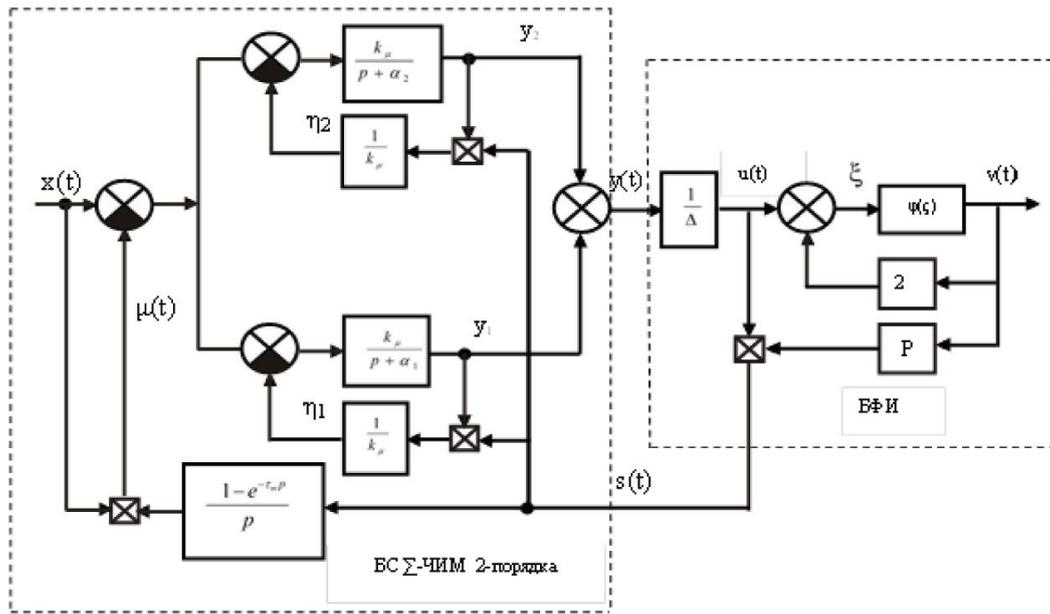


Рис. 2. Структурная схема модели Σ-ЧИМ 2 порядка

3. Оценка настроечных параметров (параметрический синтез) ЧИСС напряженности магнитного поля.

Структурное преобразование Σ-ЧИМ второго порядка. Процедура построения нелинейной системы, эквивалентной Σ-ЧИМ второго порядка, не содержащей параметрических обратных связей, приведена в работе [1] (рис. 2).

Она состоит из блока сброса (БС) и блока формирования импульса (БФИ). Блок БС осуществляет функцию фильтра (Ф) модулятора со сбросом, а блок БФИ формирует управляющие импульсы в виде δ-импульсов.

1. Математические модели частотно-импульсной системы стабилизации напряженности магнитного поля. Формирование математической модели ЧИСС напряженности магнитного поля в классе функциональных рядов Вольтерра распадается на три этапа: на первом этапе строится вольтерровская модель Σ-ЧИМ второго порядка; на втором этапе – вольтерровская модель разомкнутой системы ЧИСС и на третьем этапе – вольтерровская модель замкнутой системы ЧИСС [2].

Вольтерровская модель Σ-ЧИМ второго порядка описывается в виде

$$y(t) = m_0 + \sum_{r=1}^{\infty} \left[ m_r \otimes x(t) \right], \quad (3)$$

где символом  $[m_r \otimes x(t)]$  обозначена  $r$ -мерная свертка импульсных характеристик объекта с запаздыванием  $m_r(\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r)$  и функции  $x(t - \tau_i)$ ,  $i = 1, \tau$ , т.е.

$$[m_r \otimes x(t)] = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} x_r(\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_r) \prod_{i=1}^r x(t - \tau_i) \cdot$$

Изображения ядер ряда (3) получены в [2] в следующем виде

$$M_0(\tau_m, 0) = e_0, \quad M_1(\tau_m, p) = \frac{e_1}{\Delta} \varepsilon_1(\tau_m, p),$$

$$M_2(\tau_m, p_1, p_2) = \frac{e_2}{\Delta^2} \prod_{i=1}^2 \varepsilon_1(\tau_m, p_i),$$

$$M_3(\tau_m, p_1, p_2, p_3) = \frac{e_1}{\Delta} \varepsilon_3(\tau_m, p_1, p_2, p_3) + \frac{e_3}{\Delta^3} \prod_{i=1}^3 \varepsilon_1(\tau_m, p_i), \quad (4)$$

где  $M_0(\tau_m, p)$  и  $M_3(\tau_m, p_1, p_2, p_3)$  – соответственно изображения ядер фильтра Ф со сбросом динамического частотно-импульсного модулятора системы,  $e_0, e_1, e_2, e_3$  – постоянные параметры, характеризующие поведение блока формирования импульсов БФИ модулятора [2],  $\tau_m$  – параметр модификации,  $\Delta$  – порог импульсного устройства ИУ.

Изображения ядер фильтра  $\Phi$  со сбросом  $\Sigma$ -ЧИМ второго порядка в [2] получены в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_1(\tau_m, p) &= D_0(p) = G(p) = k_\Phi \left( \frac{1}{p + \alpha_2} - \frac{1}{p + \alpha_1} \right), \\ \varepsilon_3(\tau_m, p_1, p_2, p_3) &= D_1(p_1, p_2 + p_3) D_2(p_2, p_3) \varepsilon(p_1) \varepsilon(p_2) \varepsilon(p_3), \\ D_1(p_2, p_3) &= -\frac{1}{k_\mu} G(p_1 + p_2) \cdot D_0(p_2), \quad D_2(p_2, p_3) = e_1 \frac{1(p_2)}{\Delta^2} p_3.\end{aligned}\quad (5)$$

Вольтерровская модель разомкнутой системы (последовательное соединение модулятора и ПНЧ) имеет следующий вид

$$z(t) = \theta_0 + \sum_{r=1}^{\infty} \left[ \theta_r \otimes x(t) \right]. \quad (6)$$

где  $\theta_r(\tau_0, \tau_m, \tau_1, \dots, \tau_r)$  – импульсные характеристики модели (6).

Изображения для первых трех ядер в терминах многомерного преобразования Лапласа [3] определяются из выражений

$$\begin{aligned}\theta_0(\tau_m, \tau_0, 0) &= M_0(\tau_m, 0) \tilde{W}_1(\tau_0, 0); \quad \theta_1(\tau_m, \tau_0, p) = M(\tau_m, p) \tilde{W}_1(\tau_0, p); \\ \theta_2(\tau_m, \tau_0, p_1, p_2) &= M_2(\tau_m, p_1, p_2) \tilde{W}_1(\tau_0, p_1 + p_2); \\ \theta_3(\tau_m, \tau_0, p_1, p_2, p_3) &= M_3(\tau_m, p_1, p_2, p_3) \tilde{W}_1(\tau_0, p_1 + p_2 + p_3).\end{aligned}\quad (7)$$

$\tilde{W}_1(\tau_0, p)$  – передаточная функция ПНЧ [2].

Вольтерровская модель замкнутой системы в виде

$$x(t) = \left[ n_0 + \sum n_r \otimes x(t) \right], \quad (8)$$

где  $n_r(\tau_0, \tau_m, \tau_1, \dots, \tau_r)$  – импульсные характеристики модели (8).

Изображения первых трех ядер ряда (8) получены в виде

$$\begin{aligned}N_0(0) &= \sum_{r=0}^{\infty} N_0^r(0) \theta_r(0, \cdot(r) \cdot, 0); \\ N_1(\tau_0, \tau_m, p) &= 1 - N_1(\tau_0, \tau_m, p) \sum_{r=1}^3 N_0^{r-1}(0) \theta_r(\tau_0, \tau_m, 0, \cdot(r-1) \cdot, 0, p) + \dots + \theta_r(\tau_0, \tau_m, 0, \cdot(r-1) \cdot, 0); \\ N_2(\tau_0, \tau_m, p_1, p_2) &= -N_2(\tau_0, \tau_m, p_1, p_2) \left( \sum_{r=1}^3 N_0^{r-1}(0) [\theta_r(\tau_0, \tau_m, \cdot(r-1) \cdot, 0, p_1 + p_2) + \right. \\ &\quad \left. + \theta_r(\tau_0, \tau_m, p_1 + p_2, 0, \cdot(r-1) \cdot, 0)] - \prod_{i=1}^3 N_1(\tau_0, \tau_m, p_i) \sum_{r=2}^3 N_0^{r-2}(\tau_0, \tau_m, 0) \times \right. \\ &\quad \left. \times \theta_r(\tau_0, \tau_m, p_1, 0, \cdot(r-2) \cdot, 0, p_2) \right] + \dots + \theta_r(\tau_0, \tau_m, p_2, 0, \cdot(r-2) \cdot, 0, p_1)]; \\ N_3(\tau_0, \tau_m, p_1, p_2, p_3) &= -N_3(\tau_0, \tau_m, p_1, p_2, p_3) \sum_{r=1}^3 N_0^{r-1}(\tau_0, \tau_m, 0) \times \\ &\quad \times [\theta_r(\tau_0, \tau_m, p_1 + p_2 + p_3, 0, \cdot(r-1) \cdot, 0) + \dots + \theta_r(\tau_0, \tau_m, 0, \cdot(r-1) \cdot, 0, p_1 + p_2 + p_3)] - \\ &\quad N_1(\tau_0, \tau_m, p_1) N_2(\tau_0, \tau_m, p_2, p_3) \sum_{r=2}^3 N_0^{r-2}(\tau_0, \tau_m, 0) \times \\ &\quad \times [\theta_r(\tau_0, \tau_m, p_1 + p_2, 0, \cdot(r-2) \cdot, 0, p_1) + \dots + \theta_r(\tau_0, \tau_m, p_1, 0, \cdot(r-2) \cdot, 0, p_1 + p_3)] - \\ &\quad - \prod_{i=1}^2 N_1(\tau_0, \tau_m, p_i) \theta_3(\tau_0, \tau_m, p_1, p_2, p_3).\end{aligned}$$

Полученные вольтерровские модели (3), (6), (8) можно непосредственно использовать для статистического анализа и синтеза ЧИСС напряженности магнитного поля. В некоторых практических случаях можно поступиться точностью вычислений ради получения приемлемых результатов.

С этой целью формируются статистически линеаризованные модели ЧИСС напряженности магнитного поля в виде

$$x(t) = \int_0^{\infty} L_0^i(\tau_0, \tau_m, \bar{c}) m_f d\tau + \int_0^{\infty} L_1^i(\tau_0, \tau_m, \bar{c}) x(t - \tau) d\tau, \quad i = \bar{1}, 2. \quad (9)$$

Статистическая линеаризация ЧИСС напряженности магнитного поля может быть проведена двумя способами: раздельная и оптимальная линеаризация. В данной работе для оценки настроечных параметров управляющего устройства использована полученная оптимальной линеаризацией статистически линеаризованная модель (9), изображения ядер которой имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} L_0^{(4)}(0, \bar{c}) &= N_0(0, \bar{c}) + m_f N_1(0, \bar{c}) + m_f^2 N_2(0, 0, \bar{c}) + \sigma_f^2 [N_2(-\alpha, \alpha, \bar{c}) - N_2(\alpha_1, -\alpha_2, \bar{c})], \\ L_1^{(4)}(\tau_0, \tau_m, p, \bar{c}) &= N_1(\tau_0, \tau_m, p, \bar{c}) + m_f [N_2(\tau_0, \tau_m, p, 0, \bar{c}) + N_2(\tau_0, \tau_m, p, 0, \bar{c})] + \\ &+ 4\sigma_f^2 [N_3(\tau_0, \tau_m, -\alpha, \alpha, p, \bar{c}) + N_3(\tau_0, \tau_m, 0, p, \bar{c})] + N_3(\tau_0, \tau_m, p, -\alpha, \alpha, \bar{c}) + \\ &+ N_3(\tau_0, \tau_m, \alpha_1 - \alpha, p, \bar{c}) + N_3(\tau_0, \tau_m, \alpha_1, p, -\alpha_1, \bar{c}) + N_3(\tau_0, \tau_m, p, \alpha_1, -\alpha_1, \bar{c}), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\sigma_f^2$ ,  $\alpha$  – дисперсия и коэффициент спада корреляционной функции случайного процесса  $f(t)$ .

Оценка настроечных параметров ЧИСС напряженности магнитного поля. Использование при синтезе ЧИСС напряженности магнитного поля ее вольтерровской модели позволяет получить асимптотически точный результат. Оценка настроечных параметров ЧИСС напряженности магнитного поля на базе статистических линеаризованных моделей сводится к задаче оптимизации вида [6, 7]

$$\sigma_x^2(\bar{c}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |L_1^i(\tau_0, \tau_m, j\omega, \bar{c})|^2 S_f(\omega) d\omega \rightarrow \min, \quad (11)$$

где  $S_f(\omega) = \frac{2\sigma_f^2 \alpha}{|(\alpha + j\omega)|^2}$  – спектральная плотность входного процесса,  $L_1^i(\tau_0, \tau_m, j\omega, \bar{c})$  опре-

деляется из (10),  $\bar{c}$  – вектор оптимизируемых параметров.

Оптимизируемыми параметрами ЧИСС напряженности магнитного поля являются: коэффициент усиления фильтра –  $k_\phi$ ; первая постоянная времени фильтра  $\Sigma$ -ЧИМ –  $\frac{1}{\alpha_1}$ ; вторая постоянная времени фильтра  $\Sigma$ -ЧИМ –  $\frac{1}{\alpha_2}$ ; порог срабатывания импульсного устройства –  $\Delta$ ; длительность управляющих импульсов –  $h_u$ ; амплитуда управляющих импульсов –  $k_u$ .

Для ЧИСС напряженности магнитного поля экспериментальным путем получены следующие значения оптимальных настроечных параметров регулятора (таблица), обеспечивающие заданные значения напряженности магнитного поля.

Оптимальные настроечные параметры ЧИСС напряженности магнитного поля

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\Delta$	$h_u$	$k_\phi$	$k_u$
0,2	0,15	3,8	2,8	2,4	3,2

Полученные оптимальные настроечные параметры регулятора позволили обеспечить необходимую точность стабилизации напряженности магнитного поля, что привело к уменьшению расхода молока свертывающего фермента при выработке сыров и к изменению показателя кислотности и вязкости.

**Список литературы**

1. Айтчанов Б.Х. Применение динамического частотно-импульсного модулятора в системах управления с использованием ядерного магнитного резонанса в устройствах омагничивания жидкостей / Б.Х. Айтчанов, А.Н. Алдибекова // Вестник КазНТУ. – 2014. – № 5 (105). – С. 148–155.
2. Aitzhanov B.Kh. Dynamic Pulse-Frequency Modulation in Objects Control with Delay / B.Kh. Aitzhanov, B.K. Kurmanov, T.F. Umarov // Asian Journal of Control. – 2012. – Vol. 14, № 6. – P. 1662–1668.
3. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в Matlab / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. – М.: Лань, 2011. – 464 с.
4. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – М.: ВНУ, 2016. – 560 с.
5. Курганов В.В. Управление объектом с запаздыванием / В.В. Курганов, А.В. Цавнин // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2 (12). – С. 9–13.
6. Крюк А.Е. Синтез непрерывных нелинейных систем управления при случайных воздействиях / А.Е. Крюк, Л.А. Осипов // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 2. – С. 26–30.
7. Пашенко А.Ф. Статистическая линеаризация и идентификация нелинейных систем / А.Ф. Пашенко, Е.Ф. Пашенко. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. – С. 782–789.