

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО  
МОДУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА И КАЧЕСТВА  
МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

**СҮТ ӨНІМДЕРІНІҢ САПАСЫ МЕН ӨНДІРУ ҮРДІСТЕРІН БАСҚАРУДА  
ДИНАМИКАЛЫҚ ЖИІЛІКТІК-ИМПУЛЬСТІК МОДУЛЯТОРДЫ ҚОЛДАНУ**

**A DYNAMIC PULSE-FREQUENCY MODULATOR FOR CONTROLLING THE PROCESS OF  
PRODUCTION AND QUALITY OF MILK PRODUCTS**

*A.N. ALDIBEKOVA*  
A.N. ALDIBEKOVA

(Алматинский технологический университет)  
(Алматы технологиялық университеті)  
(Almaty Technological University)  
E-mail: aitkul\_86@mail.ru

*Статья посвящена моделированию автоматизированной системы управления процессом производства и качества молочной продукции с динамической частотно-импульсной модуляцией, фильтр которой реализован в виде апериодического звена 2-порядка (ДЧИМ с ФАЗ).*

*Получены уравнения ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка для управления режимными параметрами производства молока. Построена структурная модель ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка, процессы которой тождественны процессам в реальном модуляторе.*

*Полученная в данной работе структурная модель модулятора служит основой для построения математических моделей динамической частотно-импульсной системы управления производством и качеством молочной продукции, которые позволяют в дальнейшем разработать различные по точности и трудоемкости вычислительных процедур методы анализа и синтеза рассматриваемого в статье класса систем производства молока частотно-импульсных систем управления.*

*Мақала сүт өнімдерін өндірумен сапасын жақсарту үрдістерін фильтрі 2-ретті апериодтық буын түріндегі динамикалық жиіліктік-импульстік модуляция мен автоматтандырылған басқару жүйесін модельдеуге арналған.*

*Сүт өндірісінің режимдік параметрлерін басқару үшін динамикалық жиілікті-импульстік (ДЖИМ) фильтрдің екінші ретті апериодты буынының теңдеуі алынды. Шынайы модулятордың үрдістеріне барабар ДЖИМ фильтрінің екінші ретті апериодты буынының құрылымдық үлгісі тұрғызылды.*

*Берілген жұмыстағы алынған құрылымдық үлгі сүт өнімдерін өндіру мен сапасын жақсарту үрдістерін басқарудың математикалық үлгілерін құрудың негізі болып табылады. Осы құрылымдық үлгі ары қарай да сүт өндірісінде жиіліктік-импульстік басқару жүйесінің есептеу процедураларын синтездеу және анализдеу әдістерінің дәлдігі және еңбек көлемділігі жағынан әртүрлі жүйелік кластарын жасауға мүмкіндік береді.*

*Article is devoted to modeling the automated process control system of production and quality of milk products with dynamic frequency-modulated filter is implemented as a delay element of order 2 (DCHIM with FAZ).*

*Obtained from equation DCHIM PHASE 2-order management regime parameters of milk production. Structural model DCHIM with PHASE 2-order processes which are identical processes in real modulator.*

*Obtained in this work, the structural model of the modulator provides the basis for constructing mathematical models of dynamic pulse frequency control system of production and quality of milk*

*products, which allow further develop different accuracy and complexity of computational procedures for analysis and synthesis methods considered in the article class of systems of milk production frequency impulse control systems.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, динамический частотно-импульсный модулятор, вольтеровская модель, фильтр в виде апериодического звена 2-порядка.

**Негізгі сөздер:** автоматтандырылған басқару жүйесі, динамикалық жиіліктік-импульстік модулятор, вольтерлік модель, 2-ретті апериодтық буынның фильтрі.

**Keywords:** automatic control system, dynamic pulse-frequency modulator, Volterra model, dynamic pulse-frequency modulator, filter as a delay element of order 2.

### **Введение**

При использовании в АСУ первичных преобразователей, основанных на различных физических явлениях, позволяющих повысить точность и качество регистрируемых входных и выходных параметров, необходимо разрабатывать более совершенные регулирующие элементы.

### **Объекты и методы исследования**

Применяется метод для преобразования эквивалентной ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка нелинейной системы, названной в дальнейшем структурной моделью.

### **Результаты и их обсуждение**

Динамические частотно-импульсные системы автоматического управления (ДЧИСАУ) производства молочной продукции представляют собой замкнутую систему, состоящую из динамического частотно-импульсного модулятора с фильтром в виде апериодического звена 2 порядка (ДЧИМ с ФАЗ) и приведенной непрерывной части (ПНЧ), структурная схема которой представлена на рис.1 [1].

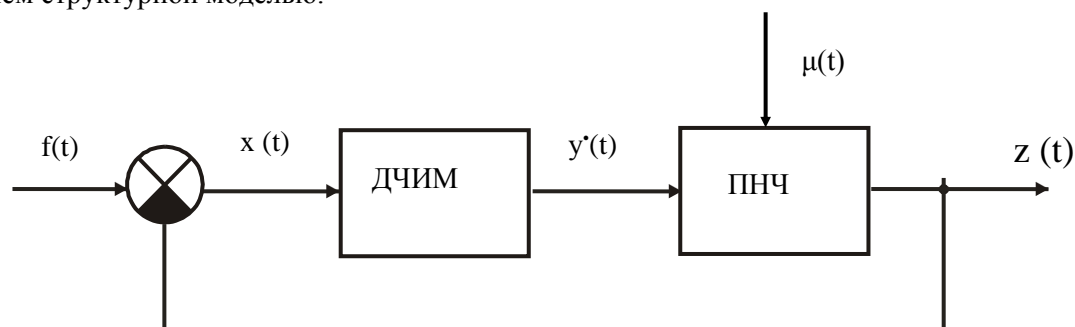


Рисунок 1 - Структурная схема ДЧИСАУ производства молочной продукции.

На входе системы управления производством молочной продукции действует стационарный случайный процесс  $f(t)$ . Прямая цепь состоит из импульсной и приведенной непрерывной частей. Импульсной частью служит ДЧИМ, преобразующий процесс ошибки  $x(t)$  в частотно-модулированную последовательность  $\delta$ -импульсов Дирака  $y'(t)$ .

Приведенная непрерывная часть ПНЧ состоит из последовательного соединения

управляемого объекта с запаздыванием, исполнительного механизма (ИМ) и формирующего элемента (ФЭ), задающего требуемую форму управляющим импульсам. Объект с запаздыванием подвержен воздействию внешнего белого шума  $\mu(t)$ . В общем случае ПНЧ характеризуется как нелинейная динамическая система со случайными параметрами и представима некоторым функциональным уравнением следующего вида [2]:

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

(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 управления.

ДЧИМ с ФАЗ 2- порядка представляет собой последовательное соединение фильтра  $\Phi$  и импульсного устройства ИУ. В фильтре  $\Phi$  осуществляется некоторое динамическое преобразование непрерывного сигнала  $x(t)$

$$y(t_{n+1} - 0) = \int_{t_n + \tau_0}^{t_{n+1} - 0} w(t_{n+1} - \tau) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta$$

(2)

где

$$\lambda_{n+1} = y(t_{n+1} - 0),$$

(3)

$w(t) = L^{-1}\{W(p)\}$  - весовая функция этого преобразования;  $W(p)$  - передаточная функция фильтра  $\Phi$ ,  $\tau_m$  - параметр динамического частотно-импульсного модуля-

в сигнал  $y(t)$ , а импульсное устройство ИУ генерирует единичный  $\delta$ -импульс в тот момент времени, когда  $y(t)$  достигает порогового значения  $\pm\Delta$  и осуществляет обнуление всех накопителей энергии, которые входят в состав  $\Phi$  [3].

Допустим, что в некоторый момент  $t_n$  на выходе ИУ появился  $n$ -й импульс. Тогда момент появления  $t_{n+1}$  ( $n+1$ -го импульса с учетом свойств объекта с запаздыванием будет определяться таким образом:

тора, учитывающий эффект запаздывания управляемого объекта ( $\tau_m \geq \tau_0$ ) [1].

Структурную модель ДЧИМ с ФАЗ 2- порядка можно формировать в виде замкнутой нелинейной системы, структурная схема которой изображена на рис. 2 [2].

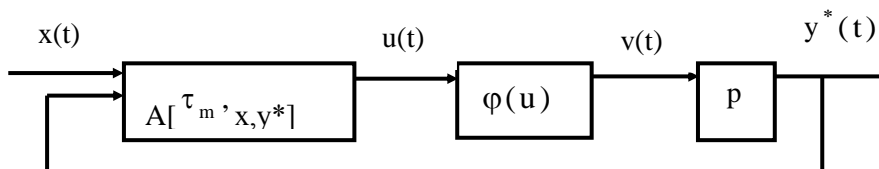


Рисунок 2 - Нелинейная эквивалентная система.

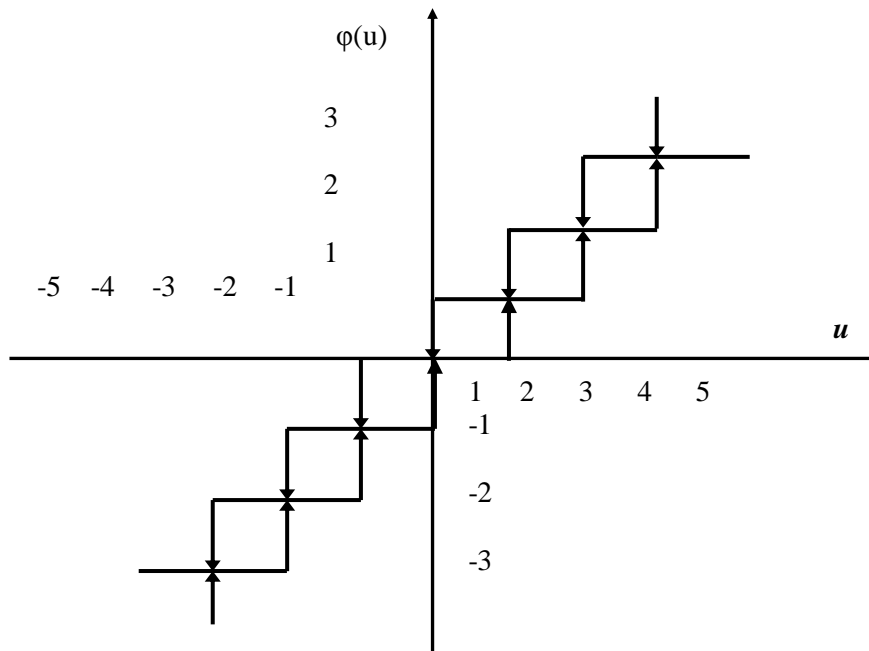


Рисунок 3 - Характеристика релейно-гистерезисного элемента.

Она содержит нелинейный фильтр, который характеризуется некоторым оператором  $A[\tau_m, x(\tau), y(\tau) / t_0 \leq \tau \leq t]$ , релейно-гистерезисный нелинейный элемент  $\varphi(u)$  (рис.3) с порогом  $\Delta$  и дифференцирующий элемент с передаточной функцией  $W_o(p) = p [1]$ .

Задача заключается в определении вида нелинейного оператора  $A$ , при котором замкнутая система, показанная на рис. 2, генерирует такую же последовательность импульсов, что и ДЧИМ при управлении объектами с запаздыванием и описываемый уравнениями (2) и (3).

Построение такого нелинейного оператора  $A$  рассмотрим для ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка, используемых для управления объектами производства молока.

ДЧИМ, фильтр которого реализован в виде апериодического звена 2-порядка, характеризуется передаточной функцией:

$$y_v(t_{n+1} - 0) = k_\mu \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1} - 0} \exp(-\alpha_2(t_{n+1} - \tau)) x(\tau) d\tau - k_\mu \int_{t_n + \tau_m}^{t_{n+1} - 0} \exp(-\alpha_1(t_{n+1} - \tau)) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (6)$$

где

$$W(p) = \frac{c_v}{p^2 + \alpha p + \beta}$$

(4)

Если в фильтре модулятора корни характеристического полинома вещественные и отрицательные, то указанную функцию можно разложить в виде:

$$W(p) = \frac{k}{\alpha_2 - \alpha_1} \left( \frac{1}{p + \alpha_2} - \frac{1}{p + \alpha_1} \right) \quad (5)$$

В дальнейшем для простоты системы обозначим  $\frac{k}{\alpha_2 - \alpha_1} = k_\mu$ .

В соответствии с уравнением (2) и (3) для модифицированного ДЧИМ с фильтром апериодического звена 2-порядка моменты появления  $t_{n+1}$  импульса определяются из уравнения:

$$\lambda_{n+1} = k_{\mu} \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} \exp(-\alpha_2(t_{n+1}-\tau))x(\tau)d\tau - k_{\mu} \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} \exp(-\alpha_1(t_{n+1}-\tau))x(\tau)d\tau = \lambda_{n+1}\Delta$$

$k_{\mu}$  - коэффициент усиления а периодического звена 2-порядка.

Рассмотрим произвольный момент времени  $t_n$ . Пусть выходной сигнал в этот момент времени равен  $y_v(t_n + 0)$ .

Тогда для моментов времени  $t \geq t_n$

$$\widehat{y}_v(t) = e^{\alpha_2(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \int_{t_n}^t e^{-\alpha_2(t-\tau)}x(\tau)d\tau - e^{-\alpha_1(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \int_{t_n}^t e^{-\alpha_1(t-\tau)}x(\tau)d\tau \quad (7)$$

где  $y_v(t)$  - выход фильтра при начальном условии  $y_v(t_n + 0)$ .

Уравнение (7) перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \widehat{y}_v(t) = & e^{-\alpha_2(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \left[ \int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} e^{-\alpha_2(t-\tau)}x(\tau)d\tau + \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} e^{-\alpha_2(t-\tau)}x(\tau)d\tau \right] - \\ & - e^{-\alpha_1(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \left[ \int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} e^{-\alpha_1(t-\tau)}x(\tau)d\tau + \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} e^{-\alpha_1(t-\tau)}x(\tau)d\tau \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Из сопоставления (6) и (8) следует, что  $\widehat{y}_v(t) = y_v(t)$ , если

$$\begin{aligned} y_v(t) = & e^{-\alpha_2(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} e^{-\alpha_2(t-\tau)}[x(\tau) - \mu(\tau)]d\tau + k_{\mu} \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} e^{-\alpha_2(t-\tau)}x(\tau)d\tau - \\ & - k_{\mu} \int e^{-\alpha_2(t-\tau)}\eta(\tau)d\tau - e^{-\alpha_1(t-t_n)}y_v(t_n + 0) + k_{\mu} \int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} e^{-\alpha_1(t-\tau)}[x(\tau) - \mu(\tau)]d\tau + \\ & + k_{\mu} \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} e^{-\alpha_1(t-\tau)}x(\tau)d\tau - k_{\mu} \int e^{-\alpha_1(t-\tau)}\eta(\tau)d\tau \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } \eta(t) = s(t) \frac{y_v(t)}{k_{\mu}} \quad (10) \quad q_{\tau_m}(t) = L^{-1} \left[ \frac{1 - \exp(-\tau_m \cdot p)}{p} \right] -$$

А для формирования сигнала  $\mu(t)$  представим в виде произведения двух сигналов

$$\mu(t) = x(t) \chi(t), \quad (11)$$

импульсная переходная функция формирующего звена второго порядка;

$s(t)$  связан с выходным сигналом

модулятора  $y^{\bullet}(t)$  [2]:

где

$$s(t) = \delta(t - t_n + 0)$$

$$\chi(t) = \int_{t_n}^t q_{\tau_m}(t - \tau)d\tau, \quad (12) \quad (13)$$

Тогда структурную модель фильтра ДЧИМ а, периодического звена 2-порядка будет формировать в виде замкнутой не линейной системы (рис.2).

Далее рассмотрим преобразование сигнала  $u(t)$ , осуществление в релейно-гистерезисном элементе (РГЭ)  $v = \varphi(u)$ . (рис.3).

Если в некоторый момент времени  $t_n - 0$  сигнал  $u(t)$  имеет значение  $u(t_n - 0)$ , то следующий момент переключения  $t_{n+1} - 0$  определяется уравнением

$$u(t_{n+1} - 0) - u(t_n - 0) = \lambda_{n+1} \Delta, \quad (14)$$

где

$$\lambda_{n+1} = \text{sign} [u(t_{n+1} - 0) - u(t_n - 0)]. \quad (15)$$

При выполнении условий (14) и (15) происходит переход сигнала  $v(t)$  с одного уровня на другой и производная сигнала  $v(t)$  определяется выражением

$$\frac{dv(t)}{dt} = \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1} + 0). \quad (16)$$

Из сравнения (8) и (13) можно заключить, что выходной сигнал импульсного устройства ИУ

$$y^*(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1} + 0). \quad (17)$$

С учетом (17) и (13) сигнал  $s(t)$  можно формировать следующим образом:

$$s(t) = y^*(t) \frac{y(t)}{\Delta} = y^*(t) \frac{y(t_n - 0)}{\Delta}. \quad (18)$$

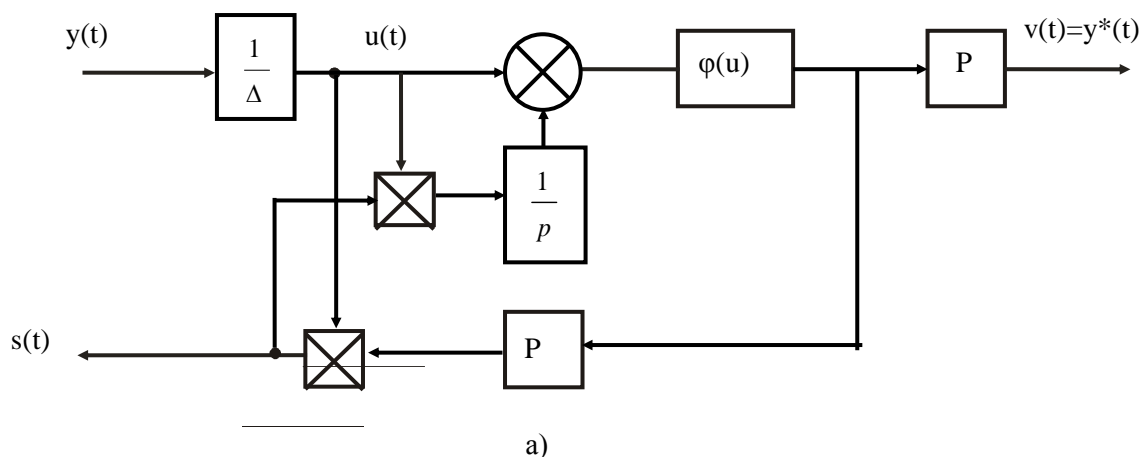
Из сопоставления (6), и (14), (15) следует, что

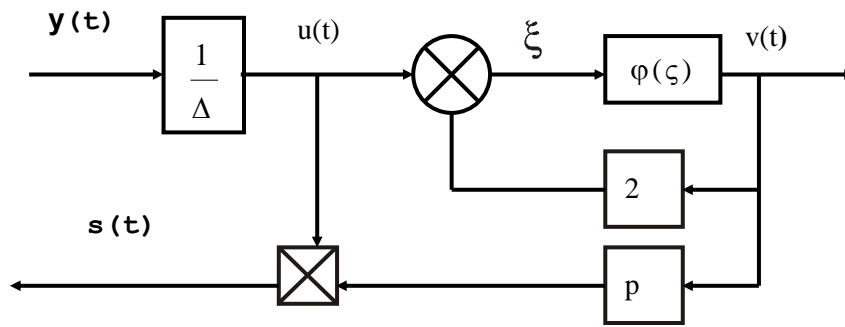
$$y(t) = u(t) - u(t_n - 0), \quad t_n + 0 \leq t \leq t_{n+1} - 0. \quad (19)$$

Отсюда, для сигнала  $u(t_{n+1})$  получим:

$$u(t_{n+1}) = y(t_{n+1} - 0) + u(t_n - 0). \quad (20)$$

Блок, содержащий релейно-гистерезисный элемент  $v = \varphi(u)$  и описываемый уравнениями (17)–(20), назовем блоком формирования импульсов (БФИ). Структурная схема БФИ изображена на рис. 4 а. Путем несложных преобразований в [4] получена эквивалентная схема блока формирования импульсов БФИ (рис.4 б).





б)

Рисунок 4 - Блок формирования импульсов модели ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка.

Оставшаяся часть оператора А, поведение которого описывается уравнениями (8)-(13), назовем блоком сброса (БС). Из выражений (8)-(13) следует, что задача определения структуры блока сброса БС

сводится к формированию сигналов  $\eta(t)$  и  $\mu(t)$  [1].

Уравнения (8), (9), (10), (11), (12) описывают поведение блока сброса БС [2]. Структурная схема модифицированного БС изображена на рис. 5.

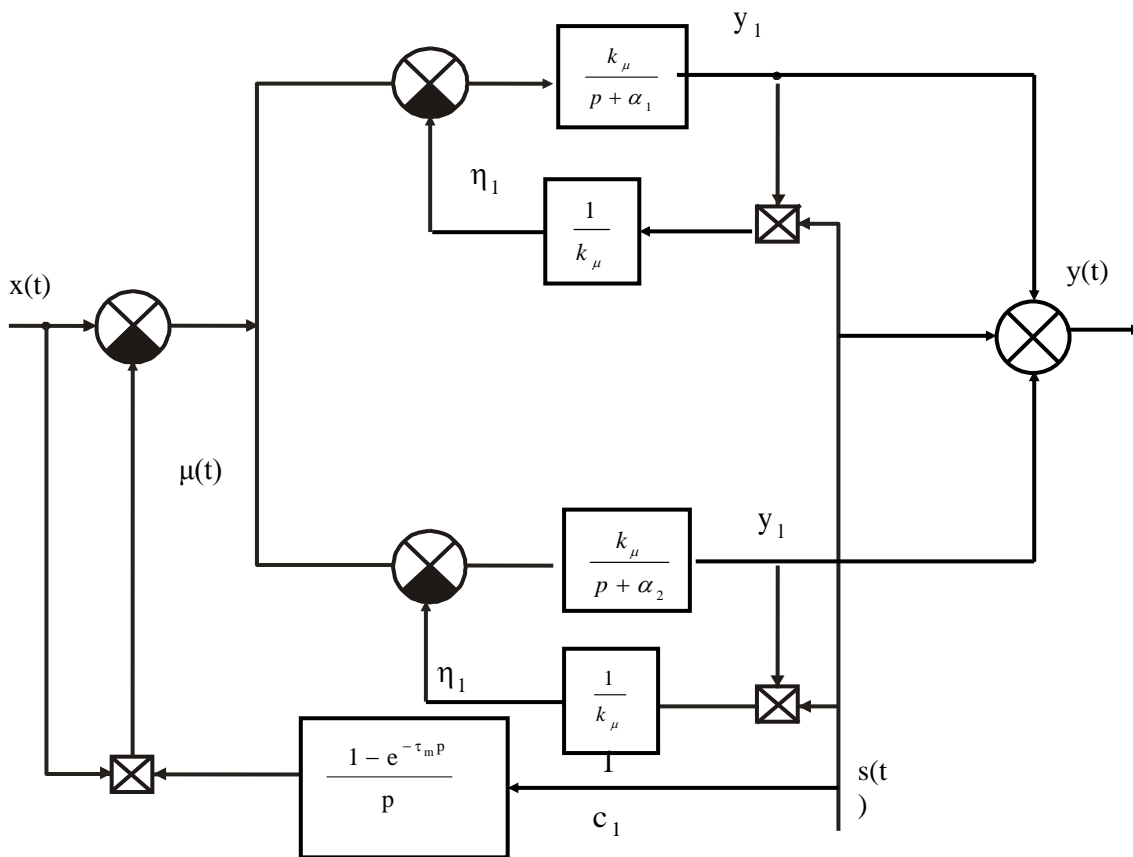


Рисунок 5 - Блок сброса ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка.

Выходной сигнал  $y(t)$  модифицированного блока сброса преобразуется блоком формирования импульсов в мгновенные  $\delta$ -импульсы. Одни импульсы  $y^*(t)$ , знак и

период повторения которых определяются знаком и интервалом непрерывности сигнала  $y(t)$ , являются выходными импульсами

модулятора, а другие  $s(t)$  всегда в эти моменты поступают обратно в БС.

Блок формирования импульсов БФИ структурной модели ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка совпадает с соответствующим блоком структурной модели ДЧИМ [2], т.е. он является универсальным для всех видов ДЧИМ.

Рассмотрим блок сброса (рис. 5). Как видно из рис. 5, в структуре модифицированного блока сброса присутствует дополнительный блок формирования сигнала  $\mu(t)$ , описываемого соотношениями (11)-(12). Назначение этого дополнительного блока заключается в формировании сигнала,

принудительно удерживающего выход интегратора  $y(t)$  в нулевом положении после выдачи импульса управления в течение времени запаздывания объекта. Вышеуказанные особенности блока сброса БС приводят к изменениям свойств системы.

В структурной модели ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка только блок сброса БС [1] зависит от свойств фильтра в модуляторе. В связи с этим процедура построения структурной модели других типов ДЧИМ будет отличаться от приведенной процедуры только процедурой построения структуры блока сброса.

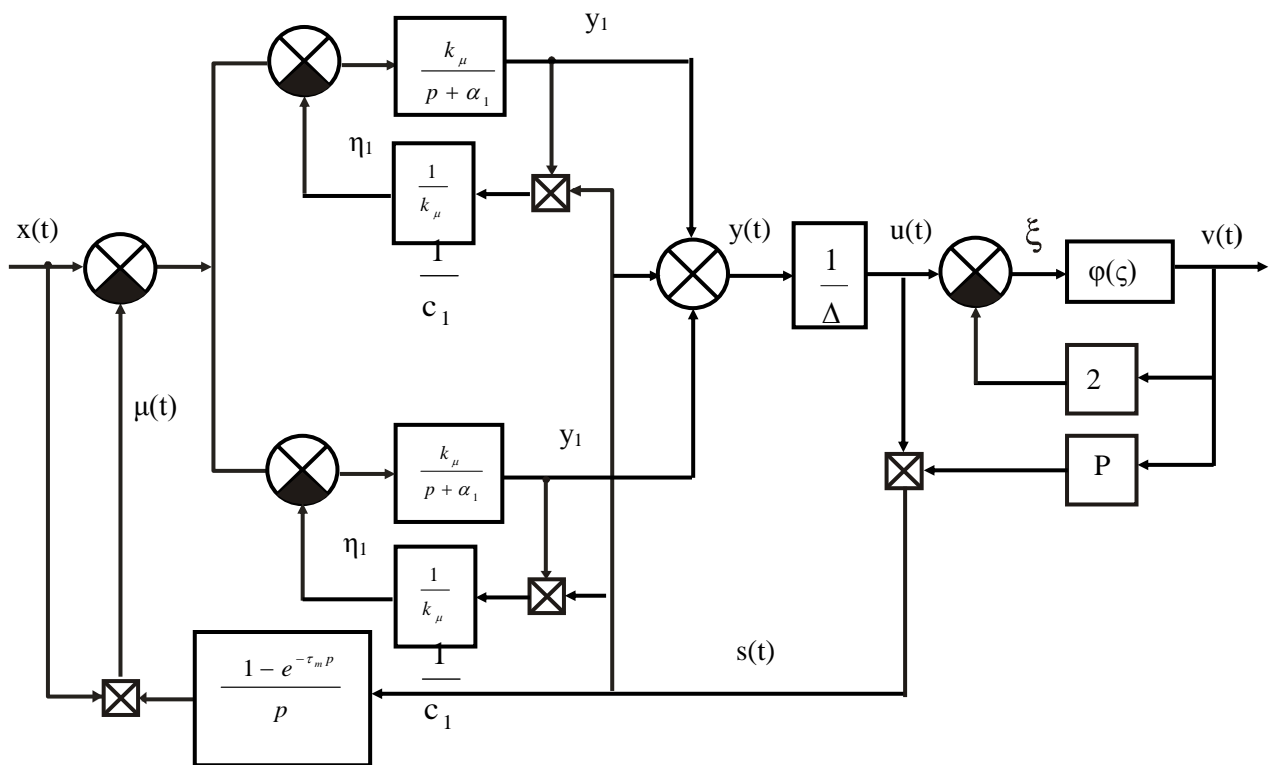


Рисунок 6 - Полная структурная схема модели ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка.



Объединяя структурные схемы блока сброса (рис. 5) и блока формирования импульсов (рис. 4), получим структурную схему системы (рис. 6), эквивалентной ДЧИМ с ФАЗ 2-порядка, но не содержащий параметрических обратных связей.

#### **Выводы и заключение**

На основе структурной модели модулятора разработаны математические модели динамической частотно-импульсной системы. Процессом управления производством и качества молочной продукции в классе функциональных рядов Вольтерра, которые позволяют в дальнейшем разработать различные по точности и трудоемкости вычислительных процедур методы анализа и синтеза рассматриваемого в статье класса систем производства молока частотно-импульсных систем управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айтчанов Б.Х. Методы математического описания частотно-импульсных систем управления объектами с запаздыванием.// Вестник КазНТУ. - Алматы: КазНТУ. -2002. -№2. (30). -С.72-82.
2. Айтчанов Б.Х. Модели динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием// Модели и методы автоматизации управления производственными системами. - Алматы: КазНТУ. -1996. Вып. 2. -С. 65-73.
3. Айтчанов Б.Х. К построению математических моделей одного класса стохастических систем управления объектами с запаздыванием //Энергетика, телекоммуникация и высшее образование в современных условиях. Алматы; АИЭС. -1998. -С.108-110.
4. B. Kh. Aitchanov, B. K. Kurmanov, and T. F. Umarov// Dynamic pulse-frequency modulation in objects control with delay. Asian Journal of Control, Vol. 14, No. 5, PP. 1–7, September 2012.- Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/asjc.471.