



УДК 519.711: 65.51

ФАКТОР АППАРАТНОЙ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТУ В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

О.С. Нуйя^а, Р.О. Пещеров^а, А.В. Ушаков^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Ushakov-AVG@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.12.14, принята к печати 27.03.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-685-694

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Нуйя О.С., Пещеров Р.О., Ушаков А.В. Фактор аппаратной среды передачи сигнала управления объекту в задаче синтеза дискретных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 685–694.

Аннотация

Предпринята попытка пересмотреть некоторые положения сложившейся теории дискретных систем в части организации аппаратной среды передачи сигнала управления техническому объекту. Известно, что формирование цифрового сигнала в задаче дискретного управления непрерывным объектом осуществляется или микроконтроллером, или микро-ЭВМ и представляется параллельным кодом, размерность которого определяется используемыми аппаратными средствами. Параллельный код за такт работы цифровой части проектируемой системы передается в терминальное устройство технического непрерывного объекта, в котором происходит цифро-аналоговое преобразование. Такого рода передача сигнала управления в технический объект предполагает ее реализацию средствами параллельных шин. Известно, что в силу имеющейся помеховой среды современными стандартами длина параллельных шин ограничена размером, не превышающим полуметра. Таким образом, в случае, если размещение устройства формирования сигнала управления и объекта управления таково, что связывающая их шина превышает 0,5 м, возникает неизбежность перехода от параллельной передачи сигнала управления объекту к выделенной последовательной. Рассмотрены системные факторы, возникающие при переходе от параллельной передачи сигнала управления к последовательной средствами современных интерфейсов. Теоретические положения проиллюстрированы примером. Статья предназначена для специалистов-системщиков и специалистов-каналщиков. Полученный алгоритм применим для управления объектами (в частности – электроприводом) на крупных промышленных предприятиях.

Ключевые слова

цифровой сигнал управления, аппаратная среда, последовательный интерфейс, агрегированная дискретная модель объекта.

Благодарности

Работа поддержана правительством Российской Федерации (грант 074-U01) и Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14. Z50.31.0031).

HARDWARE ENVIRONMENT FACTOR FOR CONTROL SIGNAL TRANSFER TO A PLANT IN THE SYNTHESIS PROBLEM OF DISCRETE SYSTEMS

O.S. Nuyya^a, R.O. Peshcherov^a, A.V. Ushakov^a^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Ushakov_AVG@yandex.ru

Article info

Received 26.12.14, accepted 27.03.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-685-694

Article in Russian

For citation: Nuyya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Hardware environment factor for control signal transfer to a plant in the synthesis problem of discrete systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 685–694.

Abstract

The paper attempts to revise certain provisions of the existing theory of discrete systems in the organization of hardware environment control signal transmission to a technical plant. It is known that the formation of a digital signal in discrete control problem of continuous plant is carried out by microcontroller or micro-computer and is represented by a parallel code, which dimension is determined by the hardware used. The parallel code for a digital clock cycle of the designed system is transmitted to the terminal device of a technical continuous plant, where the digital-to-analog conversion takes place. This kind of control signal transmission to the technical plant asserts its implementation by means of parallel buses. It is known

that the length of a parallel bus is limited to an amount not exceeding half a meter due to the existing interference environment with modern standards of length. Thus, if the placement of the control signal and control plant is such that their connecting bus length exceeds more than half a meter, there is the inevitable transition from the parallel control signal to an allotted serial. The paper deals with the system factors arising in the transition from the parallel control signal to the serial by modern interfaces. Provisions of the paper are illustrated by an example. This paper is intended for system analytics and channel specialists. The resulting algorithm is applicable for control of plants (electric drive, in particular) in the large industrial factories.

Keywords

digital control signal, hardware environment, serial interface, aggregated discrete model of the plant.

Acknowledgements

The work has been partially financially supported by the Government of the Russian Federation (Grant 074-U01) and the Ministry of Education and Science (Project 14. Z50.31.0031).

Введение

В работе предпринята попытка пересмотреть некоторые положения сложившейся теории дискретных систем [1–5] в части организации аппаратной среды передачи сигнала управления техническому объекту. Известно, что формирование сигнала в задаче дискретного управления непрерывным техническим объектом (НТО) осуществляется цифровыми вычислительными средствами и представляется параллельным кодом, размерность которого определяется размерностью используемых аппаратных средств формирования и преобразования сигналов. Параллельный код за такт работы цифровой части проектируемой системы передается в терминальное устройство технического непрерывного объекта, в котором происходит цифро-аналоговое преобразование. Такого рода передача сигнала управления в технический объект предполагает ее реализацию средствами параллельных шин. Известно, что в силу реально существующей помеховой среды современными стандартами, такими как IEEE 896.1, IEEE 1014, IEEE 1296 [6], максимальная длина параллельных шин ограничена размером, не превышающим полуметра. Таким образом, в случае, если размещение устройства формирования сигнала управления и объекта управления таково, что связывающая их шина превышает 0,5 м, неизбежен переход от параллельной передачи сигнала управления объекту к выделенной некоммутируемой последовательной, используемой в протоколе PPP. В работе ставится задача рассмотреть системные каналные факторы [7–9], возникающие при переходе от параллельной передачи сигнала управления к последовательной средствами современных интерфейсов, которые приводят к уменьшению пропускной способности среды передачи сигнала, а следовательно, к снижению эффективности дискретного управления. Положение настоящей работы проиллюстрировано примерами решения задачи с использованием USB, CAN и RS232 [10–12].

Постановка задачи

В настоящее время сложился [1–5] канонический алгоритм синтеза цифрового управления непрерывными техническими объектами, базирующийся на использовании возможностей модальных представлений.

Алгоритм 1 (A1)

0. Сформировать требования к показателям качества системы цифрового управления (СЦУ) НТО в переходном и установившемся режимах.

1. Задать векторно-матричное описание (ВМО) «вход–состояние–выход» (ВСВ) НТО в форме

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t); \quad y(t) = Cx(t), \tag{1}$$

где x, u, y – соответственно векторы состояния, управления и выхода объекта; $x \in R^n, u \in R^r, y \in R^m$; A, B, C – соответственно матрицы состояния, управления и выхода, согласованные по размерности с векторами x, u, y , так что $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times r}, C \in R^{m \times n}$, при этом пара матриц (A, B) должна быть управляемой, а пара (A, C) – наблюдаемой.

2. Сформировать дискретное представление НТО (1) с учетом того, что кусочно-постоянное на интервале дискретности длительности Δt управление выводится из управляющей микро-ЭВМ или микроконтроллера в дискретные моменты времени $t = k(\Delta t)$,

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k); \quad y(k) = \bar{C}x(k), \tag{2}$$

на основе его (A, B, C) – непрерывного представления (1) с матричными компонентами, записываемыми в форме

$$\bar{A} = \exp(A \cdot \Delta t); \quad \bar{B} = A^{-1} \cdot (\bar{A} - I) \cdot B = (\bar{A} - I) \cdot A^{-1} \cdot B; \quad \bar{C} = C,$$

так, что оказываются справедливыми соотношения: $\dim \bar{A} = \dim A, \dim \bar{B} = \dim B, \dim \bar{C} = \dim C$.

3. Ввести гипотезу о полной измеримости задающего воздействия $g(k)$ и вектора состояния $x(k)$ с целью формирования закона управления вида

$$\mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{K}}_g \mathbf{g}(k) - \bar{\mathbf{K}}_x \mathbf{x}(k), \quad (3)$$

позволяющего на основе агрегирования (2) и (3) сформировать дискретную модель проектируемой системы, имеющую векторно-матричное описание

$$\mathbf{x}(k+1) = \bar{\mathbf{F}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{G}}\mathbf{g}(k); \quad \mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k), \quad (4)$$

где

$$\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}}; \quad \bar{\mathbf{G}} = \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}}_g.$$

4. Выбрать непрерывную полиномиальную модальную модель (ПММ) [13] желаемого поведения «вход-выход» непрерывной версии проектируемой системы с передаточной функцией $\Phi(s, \omega_0)$, представленной в виде наблюдаемой пары матриц $(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{H})$, где $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{\Gamma}(\omega_0)$ является носителем желаемой структуры собственных чисел (мод), параметризованных характеристической частотой ω_0 , удовлетворяющей условиям Котельникова–Шеннона [14, 15]

$$\omega_0 = \arg \left\{ \pi / \Delta t \geq \Delta \omega_{0,05}(\omega_0) \right\},$$

$$\sigma\{\mathbf{\Gamma}(\omega_0)\} = \{\lambda_i(\omega_0); i = \overline{1, n}\},$$

определяющим требуемые динамические показатели непрерывной версии системы, $\mathbf{\Gamma} \in R^{n \times n}$; $\dim \mathbf{H} = \dim \mathbf{B}^T$; $(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{H})$ образуют наблюдаемую пару матриц.

5. Сконструировать дискретную $(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{H})$ – версию непрерывной модальной модели из пункта 4 алгоритма с парой матриц $(\bar{\mathbf{\Gamma}}, \bar{\mathbf{H}})$, в соответствии с соотношением

$$\bar{\mathbf{\Gamma}} = \exp(\mathbf{\Gamma} \Delta t),$$

или в одном из канонических базисов в силу представления

$$\bar{\mathbf{\Gamma}} = \arg \left\{ \sigma\{\bar{\mathbf{\Gamma}}\} = \left\{ \bar{\lambda}_i = \exp \lambda_i \Delta t; i = \overline{1, n} \right\} \right\}.$$

6. Сформировать матрицу $\bar{\mathbf{H}}$ в форме $\bar{\mathbf{H}} = \arg \left\{ \text{observ}(\bar{\mathbf{\Gamma}}, \bar{\mathbf{H}}) \& \dim \bar{\mathbf{H}} = \dim \bar{\mathbf{B}}^T \right\}$.
7. Решить матричное уравнение Сильвестра относительно матрицы $\bar{\mathbf{M}}$ $\left\{ \bar{\mathbf{M}}\bar{\mathbf{\Gamma}} - \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{M}} = -\bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{H}} \right\}$.
8. Вычислить матрицу обратной связи $\bar{\mathbf{K}}$ по вектору состояния дискретного объекта управления в законе управления вида (3) в силу соотношения $\bar{\mathbf{K}} = \bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{M}}^{-1}$.

9. Сформировать матрицу $\bar{\mathbf{K}}_g$ прямой связи по задающему воздействию $\mathbf{g}(k)$ ($\mathbf{g}(k) \in R^m$) на основании требований к свойствам отношения «вход–выход» проектируемой дискретной системы, обязательным из которых является равенство входа и выхода при неподвижном положении, так что выполнение последнего позволяет записать

$$\bar{\mathbf{K}}_g = \arg \left\{ \bar{\mathbf{C}}(z\mathbf{I} - \bar{\mathbf{F}})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}}_g \Big|_{z=1} = \mathbf{I} \right\} = [\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{I} - \bar{\mathbf{F}})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{B}}]^{-1}.$$

10. Построить аналитическое представление процесса формирования сигнала управления в форме

$$\mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{K}}_g \mathbf{g}(k) - \bar{\mathbf{K}}_x \mathbf{x}(k). \quad (5)$$

11. Объединить соотношения (2) и (5) с целью получения аналитического описания спроектированной дискретной системы:

$$\mathbf{x}(k+1) = \bar{\mathbf{F}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{G}}\mathbf{g}(k); \quad \mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k),$$

где

$$\bar{\mathbf{F}} = \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}} = \bar{\mathbf{M}}\bar{\mathbf{\Gamma}}\bar{\mathbf{M}}^{-1}, \quad \bar{\mathbf{G}} = \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{K}}_g.$$

12. Провести промежуточное исследование динамических показателей спроектированной дискретной системы (4) в программной оболочке MATLAB с расширением Simulink на предмет возможной модификации использованной при синтезе модальной модели.

13. Совершить отказ от гипотезы о полной измеримости задающего внешнего воздействия $\mathbf{g}(k)$, позволяющей построить реализацию цифрового закона управления (3) в форме, использующей доступный непосредственному измерению сигнал ошибки $\boldsymbol{\varepsilon}(k) = \mathbf{g}(k) - \mathbf{y}(k)$, формируемой с помощью единичной отрицательной связи по выходу:

$$\mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{K}}_g \mathbf{g}(k) - \bar{\mathbf{K}}_x \mathbf{x}(k) = \bar{\mathbf{K}}_g \mathbf{g}(k) - \bar{\mathbf{K}}_y \mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{K}}_x \mathbf{x}(k) \Big|_{\bar{\mathbf{K}}_g = \bar{\mathbf{K}}_y = \bar{\mathbf{K}}_x} = \bar{\mathbf{K}}_g \boldsymbol{\varepsilon}(k) - \bar{\mathbf{K}}_x \mathbf{x}(k), \quad (6)$$

где матрица $\bar{\mathbf{K}}_x$ вычисляется с помощью соотношения $\bar{\mathbf{K}}_x = \bar{\mathbf{K}} - \bar{\mathbf{K}}_g \bar{\mathbf{C}}$.

При этом, если геометрические параметры аппаратного пространства допускают использование параллельного интерфейса, то полученные результаты оказываются осуществимыми, и синтезированное устройство формирования сигнала управления (6) может быть рекомендовано для технической реализации, в результате чего будет построена дискретная система цифрового управления непрерывным объектом, представленная структурной схемой на рис. 1.

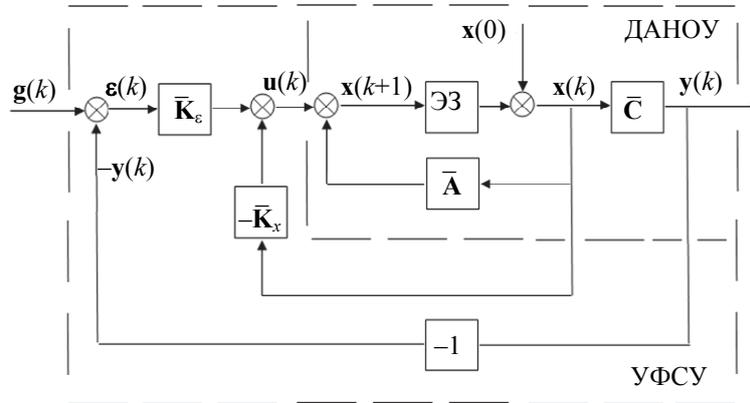


Рис. 1. Структурная схема дискретной системы цифрового управления непрерывным техническим объектом. ДАНОУ – дискретный аналог непрерывного объекта управления, УФСУ – устройство формирования сигнала управления, ЭЗ – элемент задержки

14. Совершить отказ от гипотезы полной измеримости вектора $\mathbf{x}(k)$ состояния объекта (2) и заменить его оценкой $\mathbf{x}_e(k)$, формируемой динамическим наблюдающим устройством (ДНУ), задаваемым в форме $\mathbf{x}_e(k+1) = \bar{\mathbf{F}}_e \mathbf{x}_e(k) + \bar{\mathbf{L}}_e \mathbf{y}(k) + \bar{\mathbf{B}}_e \mathbf{u}(k)$, где матрицы $\bar{\mathbf{F}}_e, \bar{\mathbf{L}}_e$ ДНУ выбираются из условия $\bar{\mathbf{F}}_e = \arg\{\sigma\{\bar{\mathbf{F}}_e\} < \sigma\{\bar{\mathbf{F}}\} \& \sigma\{\bar{\mathbf{A}}\} \cap \sigma\{\bar{\mathbf{F}}_e\} = 0\}$, $\bar{\mathbf{L}}_e = \arg\{contr\{\bar{\mathbf{F}}_e, \bar{\mathbf{L}}_e\}\}$; $<$ – знак мажоризации, означающий в данной задаче, что моды матрицы состояния наблюдателя локализованы на комплексной плоскости в круге меньшего радиуса, чем радиус круга локализации мод матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ состояния дискретной системы (4).

15. Вычислить матрицу $\bar{\mathbf{T}}_e$ подобия вектора наблюдения $\mathbf{x}_e(k)$ вектору состояния $\mathbf{x}(k)$, задаваемого в форме $\mathbf{x}_e(k) = \bar{\mathbf{T}}_e \mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{\Theta}}_e(k)$, в силу решения матричного уравнения Сильвестра

$$\bar{\mathbf{T}}_e \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{F}}_e \bar{\mathbf{T}}_e = \bar{\mathbf{L}}_e \bar{\mathbf{C}}_e, \quad (7)$$

которая позволяет сформировать матрицу входа $\bar{\mathbf{B}}_e$ в форме

$$\bar{\mathbf{B}}_e = \bar{\mathbf{T}}_e \bar{\mathbf{B}} \quad (8)$$

так, что (7) и (8) обеспечивают асимптотическую сходимость к нулю вектора невязки наблюдения $\bar{\mathbf{\Theta}}_e(k)$ в формах $\bar{\mathbf{\Theta}}_e(k+1) = \bar{\mathbf{F}}_e \bar{\mathbf{\Theta}}_e(k)$; $\bar{\mathbf{\Theta}}_e(0) = \bar{\mathbf{T}}_e \mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_e(0)$, $\bar{\mathbf{\Theta}}_e(k) = (\bar{\mathbf{F}}_e)^k \bar{\mathbf{\Theta}}_e(0)$.

16. Сформировать физически реализуемую динамическую версию исходного «алгебраического» закона управления (3) в форме

$$\mathbf{u}(k) = \bar{\mathbf{K}}_e \boldsymbol{\varepsilon}(k) - \bar{\mathbf{N}} \mathbf{y}(k) - \bar{\mathbf{D}} \mathbf{x}_e(k), \quad (9)$$

где матрицы связей $\bar{\mathbf{N}}$ по выходу объекта управления и $\bar{\mathbf{D}}$ по вектору состояния динамического наблюдающего устройства вычисляются в силу матричного равенства

$$(\bar{\mathbf{N}}, \bar{\mathbf{D}}) = \arg\left\{ \left[\bar{\mathbf{N}}; \bar{\mathbf{D}} \right] \cdot \left[\bar{\mathbf{C}}^T; \bar{\mathbf{T}}_e^T \right]^T = \bar{\mathbf{K}}_x \right\}.$$

17. Провести комплексное исследование спроектированной системы цифрового управления непрерывным техническим объектом с динамическим формирователем сигнала управления, имеющей дискретное векторно-матричное описание $\mathbf{x}_\Sigma(k+1) = \bar{\mathbf{F}}_\Sigma \mathbf{x}_\Sigma(k) + \bar{\mathbf{G}}_\Sigma \mathbf{g}(k)$; $\mathbf{x}_\Sigma(0)$; $\mathbf{y}(k) = \bar{\mathbf{C}}_\Sigma \mathbf{x}_\Sigma(k)$, где $\mathbf{x}_\Sigma(k) = col\{\mathbf{x}(k), \bar{\mathbf{\Theta}}_e\}$; $\bar{\mathbf{F}}_\Sigma = col\left\{ \left[\bar{\mathbf{F}}, \bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{D}} \right], \left[0; \bar{\mathbf{F}}_e \right] \right\}$, $\bar{\mathbf{G}}_\Sigma = col\{\bar{\mathbf{G}}, 0\}$; $\bar{\mathbf{C}}_\Sigma = col\{\bar{\mathbf{C}}, 0\}$, в программной оболочке MATLAB с расширением Simulink на предмет оценки степени влияния на динамические показатели в переходном и установившемся режимах спроектированной системы по выходу и ошибке при нулевом начальном состоянии управляемого объекта и ненулевом внешнем задающем воздействии $\mathbf{g}(k)$ и при ненулевом начальном состоянии объекта и нулевом задающем воздействии с целью модификации параметров динамического наблюдающего устройства, а возможно, и алгоритма (5),

формирующих сигнал управления (9) в целом в случае заметных выбросов по выходу при ненулевом начальном состоянии объекта, которые могут привести объект в неработоспособное состояние.

18. Если геометрические параметры аппаратного пространства в этом случае так же допускают использование параллельного интерфейса, то полученные результаты оказываются осуществимыми, и синтезированное устройство формирования сигнала управления (9) может быть рекомендовано для технической реализации, в результате чего будет построена дискретная система цифрового управления непрерывным объектом, представленная структурной схемой на рис. 2.

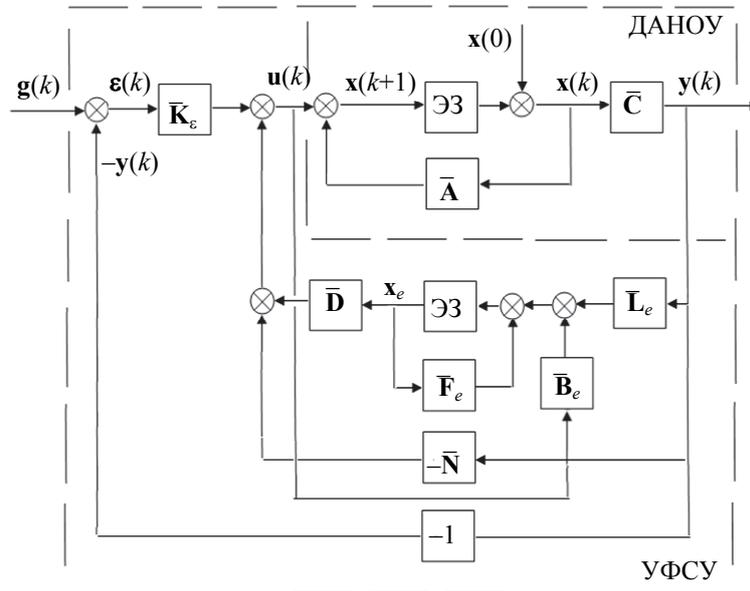


Рис. 2. Структурная схема дискретной системы цифрового управления непрерывным техническим объектом с наблюдателем

Если геометрические параметры аппаратного пространства передачи сигнала управления не допускают использование параллельного интерфейса, то возникает необходимость использования альтернативного варианта передачи сигнала управления в формах (5), (9) объекту управления (2), (1) с помощью последовательного интерфейса. В этой связи ставится задача: оценить, к каким системным проблемам приводят переход от параллельного интерфейса к последовательному, и как этот переход скажется на качественных показателях цифровой системы управления непрерывным техническим объектом.

Основной результат

Необходимость перехода от параллельного интерфейса к последовательному в сигнальных цепях дискретной системы цифрового управления в прямой ветви и ветви основной обратной связи приводит к решению задачи построения системы цифрового управления непрерывным объектом, представленной структурной схемой на рис. 3.

Сравнение структурных схем дискретных СЦУ непрерывным объектом (рис. 3, рис. 1 и рис. 2) обнаруживает заметное их различие. Это различие вызвано следующими системными «канальными факторами» [7–9], порожденными включением в состав дискретной системы последовательного интерфейса:

- аппаратные средства формирования и преобразования сигналов используют параллельное представление кодов, что порождает четырехтактное преобразование «параллельный – последовательный» при передаче и «последовательный – параллельный» при приеме в прямом и обратном каналах связи с определенными временными затратами;
- современные последовательные интерфейсы снабжены средствами помехозащиты по технологии CRC, используемые в режиме обнаружения ошибок, что приводит к увеличению формата кода за счет введения в его состав проверочных разрядов;
- неизбежно использование динамического наблюдающего устройства при формировании сигнала управления в силу того, что параллельный интерфейс является векторным, а последовательный – скалярным;
- характер организации обмена информацией может быть «дуплексным» или «полудуплексным» в зависимости от конкретных свойств используемого последовательного интерфейса, что также приводит к дополнительным временным затратам;

- использование помехозащищенных кодов (ПЗК) CRC-технологий в режиме обнаружения искажений порождает необходимость повторов передаваемых кодов, что влечет за собой дополнительные временные затраты;
- возможно, необходимо скремблирование – дескремблирование передаваемой – принимаемой кодовой комбинации цифрового сигнала управления.

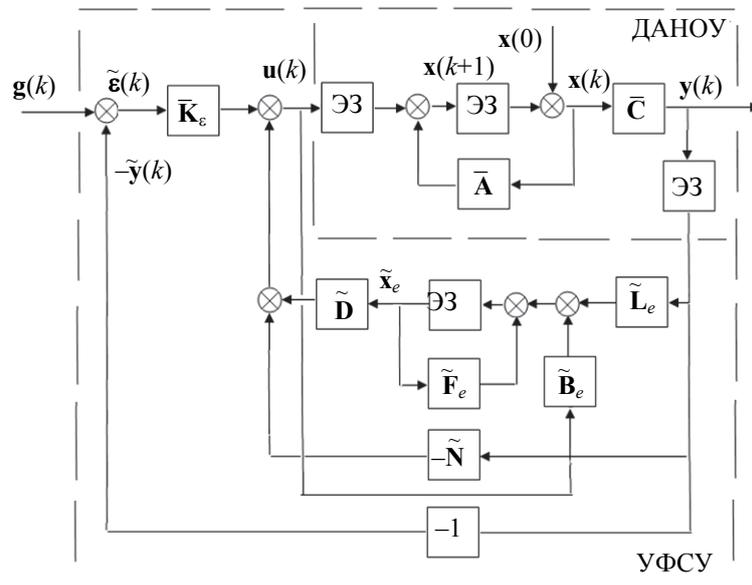


Рис. 3. Структурная схема дискретной системы цифрового управления непрерывным техническим объектом с наблюдателем при последовательном интерфейсе

Все перечисленные факторы канальной среды являются системными. Первые два из них увеличивают размерность дискретной модели НТО на два, а остальные значительно по сравнению с длительностью бита используемого интерфейса увеличивают интервал дискретности, с которым осуществляется обмен информацией по прямому и обратному каналам связи интерфейсной среды.

В совокупности все факторы канальной среды, как будет показано ниже, существенным образом ограничивают возможности разработчиков системы цифрового управления непрерывным объектом обеспечить управляемым процессам желаемые динамические показатели. Причем, третий из перечисленных факторов делает нереализуемым построение системы цифрового управления непрерывным объектом по схеме рис. 1.

Анализ приведенных выше факторов, порожденных переходом от параллельной аппаратной среды к последовательной, заставляет модифицировать и алгоритм синтеза закона цифрового управления непрерывным объектом, имеющим в своем составе последовательную канальную среду. Модифицированный алгоритм синтеза получает следующее представление.

Алгоритм 2 (А2)

1. Выполнить пункты 0–1 алгоритма А1 – формирование требований к показателям качества и задание агрегированного ВМО.
2. Выбрать последовательный интерфейс, по паспортным данным которого получить информацию о:
 1. скорости передачи информации $C \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right)$ с целью оценки длительности бита $\Delta t_b = C^{-1}$;
 2. степени m образующего многочлена используемой в данном интерфейсе CRC-технологии.
3. Сформировать интервал дискретности, с которым в выбранном последовательном интерфейсе будет осуществляться обмен между формирователем сигнала управления и объектом управления с учетом n_d – размерности аппаратных средств формирования и преобразования сигналов, а также перечисленных выше канальных факторов в силу соотношений

$$\Delta t_A = \Delta t_b (n_d + m + 1) \quad (10)$$

в случае «дуплекса» без скремблирования;

$$\Delta t_A = 2\Delta t_b (n_d + m + 1)$$

в случае «полудуплекса» без скремблирования;

$$\Delta t_A = \Delta t_b (n_d + m + 3) \quad (11)$$

в случае «дуплекса» со скремблированием;

$$\Delta t_A = 2\Delta t_b (n_d + m + 3) \quad (12)$$

в случае «полудуплекса» со скремблированием.

4. Выполнить пункт 2 алгоритма А1 – формирование дискретного представления НТО.
5. Дополнить модель дискретного представления исходного объекта пункта 4 с задержками в прямом и обратном каналах связи, сформировав тем самым агрегированное дискретное представление непрерывного объекта с учетом фактора последовательного интерфейса размерностью $n_A = n + 2$.
6. Выполнить пункты 4–7 алгоритма А1 – выбор непрерывной и конструирование дискретной версии агрегированной ПММ и решение матричного уравнения Сильвестра, с точностью до замены матричных компонентов без индексов на компоненты с индексами по схеме $(*) \rightarrow (*)_A$.
7. Выполнить пункт 10 алгоритма А1 – построение аналитического представления процесса формирования сигнала управления.
8. Выполнить пункты 13–16 алгоритма А1 – отказ от гипотезы полной измеримости вектора состояния объекта и замена его оценкой, формируемой ДНУ, вычисление матрицы подобия вектора наблюдения вектору состояния, формирование физически реализуемой динамической версии исходного «алгебраического» закона управления.
9. Выполнить пункт 17 алгоритма А1 – комплексное исследование спроектированной СЦУ непрерывным техническим объектом с динамическим формирователем сигнала управления – на предмет оценки корректности выбора последовательного интерфейса: в случае отрицательного результата перейти к пункту 2, в случае положительного – к пункту 10.
10. Принять СЦУ непрерывным техническим объектом с последовательным интерфейсом в его составе к технической реализации по схеме (рис. 3).

Иллюстративные примеры

В качестве примера рассмотрим задачу передачи сформированного микроконтроллером (МК) цифрового управления в случае, когда невозможно использование параллельного интерфейса, по следующим данным.

1. Используемый МК Microchip PIC24FJ128GC010 – МК PIC с 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), поддерживающим частоту отсчетов 10 МГц, имеющим USB-порт ($n_d = 12$).

2. НТО – управляемый электропривод с передаточной функцией $W(s) = \frac{K}{(Ts+1)s}$ (ради определенности

положим $K = 20 \frac{\text{рад}}{(\text{с} \cdot \text{В})}$, $T = 2\text{с}$, который порождает непрерывный аналог СЦУ размерности

$n_A = n + 2 = 4$).

3. Аппаратные средства кодовых преобразований типа «параллельный – последовательный», «последовательный – параллельный», а также АЦП, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и МК характеризуются разрядностью $n_p = 12$.

4. Постановка задачи. Оценить в функциях используемых последовательных интерфейсов (Serial Bus, SB) и длин L_k их кабелей при условии обеспечения в системе управления НТО нулевого перерегулирования ($\sigma = 0\%$) предельно допустимые значения длительности t_n переходного процесса и добротности по скорости D .

5. Решение задачи

Вариант 5.1 (SB – USB 2.0, $L_k = 5\text{ м}$)

5.1.1. Используемый SB USB 2.0 с характеристиками:

– обмен информацией – полудуплексный;

– пропускная способность – $480 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$;

– помехозащита – технологией CRC с образующим полиномом $\mathbf{g}(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ ($m = 16$) в режиме обнаружения;

– синхронизация – скремблирование.

5.1.2. Формирование формата ПЗК дает код $(n_c, k_c) \Big|_{k_c = n_d = 12, n_c = k_c + m = 28} = (28, 12)$.

5.1.3. Вычисление длительности Δt_b бита передачи последовательного кода, определяемого скоростью $C = 10^7 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$ МК, дающее значение $\Delta t_b = 10^{-7} \text{ с}$.

5.1.4. Вычисление Δt_A с помощью (11) приводит к значению $\Delta t_A = \Delta t_A(\Delta t_b, n_c) = \Delta t_A = 2\Delta t_b(n_c + 3) = 62 \cdot 10^{-7} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

5.1.5. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего полосу пропускания ПММ с характеристической частотой в форме $(\Delta\omega(\omega_0)) = \arg(M(\omega) = 0,05) = 2\omega_0$, и теоремы Котельникова–Шеннона зафиксировать связь интервала дискретности Δt_A с характеристической частотой ω_0 в форме

$$\omega_0 = \arg\{(\Delta\omega(\omega_0)) \leq \pi/(\Delta t_A)\} = \arg\{2\omega_0 \leq \pi/(6,2 \cdot 10^{-6})\} \approx 2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

5.1.6. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего длительность переходного процесса t_n и добротности по скорости D с характеристической частотой ω_0 в форме $t_n = 7,8/\omega_0$, $D = 0,25\omega_0$, а также результатов предыдущего пункта оценить предельно достижимые значения $t_n = 7,8/\omega_0 = 7,8/(2,5 \cdot 10^5) = 3,12 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ и $D = 0,25\omega_0 = 0,25 \cdot (2,5 \cdot 10^5) = 6,25 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ с используемым SB.

Вариант 5.2. (SB RS-232, $L_k = 10 \text{ м}$)

5.2.1. Используемый SB – RS-232 с характеристиками:

- обмен информацией – дуплексный;
- пропускная способность – $115 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}$;
- помехозащита – технологией CRC с образующим полиномом $g(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ ($m = 16$) в режиме обнаружения;
- синхронизация – без скремблирования.

5.2.2. Формирование формата ПЗК дает код $(n_c, k_c) \Big|_{k_c=n_d=12, n_c=k_c+m=28} = (28, 12)$.

5.2.3. Вычисление длительности бита Δt_b передачи последовательного кода, определяемого скоростью $C = 1,15 \cdot 10^5 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$ МК, дающее значение $\Delta t_b = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

5.2.4. Вычисление Δt_A с помощью (10) приводит к значению $\Delta t_A = \Delta t_A(\Delta t_b, n_c) = \Delta t_A = \Delta t_b(n_c + 1) = 29 \cdot 8,7 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

5.2.5. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего полосу пропускания ПММ с характеристической частотой в форме $(\Delta\omega(\omega_0)) = \arg(M(\omega) = 0,05) = 2\omega_0$, и теоремы Котельникова–Шеннона зафиксировать связь интервала дискретности Δt_A с характеристической частотой ω_0 в форме

$$\omega_0 = \arg\{(\Delta\omega(\omega_0)) \leq \pi/(\Delta t_A)\} = \arg\{2\omega_0 \leq \pi/(2,5 \cdot 10^{-4})\} \approx 6,3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

5.2.6. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего длительность переходного процесса t_n и добротности по скорости D с характеристической частотой ω_0 в форме $t_n = 7,8/\omega_0$, $D = 0,25\omega_0$, а также результатов предыдущего пункта оценить предельно достижимые значения $t_n = 7,8/\omega_0 = 7,8/(6,3 \cdot 10^3) = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ и $D = 0,25\omega_0 = 0,25 \cdot (6,3 \cdot 10^3) = 1,58 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ с используемым SB.

Вариант 5.3. (SB CAN, $L_k = 100 \text{ м}$)

5.3.1. Используемый SB – CAN с характеристиками:

- обмен информацией – полудуплексный;
- пропускная способность – $500 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}$;
- помехозащита – технологией CRC с образующим полиномом $g(x) = x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$ ($m = 15$) в режиме обнаружения;

– синхронизация – скремблирование.

5.3.2. Формирование формата ПЗК дает код $(n_c, k_c) \Big|_{k_c=n_d=12; n_c=k_c+m=28} = (27, 12)$.

5.3.3. Вычисление длительности бита Δt_b передачи последовательного кода, определяемого скоростью

$C = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$ МК, дающее значение $\Delta t_b = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

5.3.4. Вычисление Δt_A с помощью (12) приводит к значению $\Delta t_A = \Delta t_A(\Delta t_b, n_c) = \Delta t_A = 2\Delta t_b(n_c + 3) = 2 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

5.3.5. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего полосу пропускания ПММ с характеристической частотой в форме $(\Delta\omega(\omega_0)) = \arg(M(\omega) = 0,05) = 2\omega_0$, и теоремы Котельникова–Шеннона зафиксировать связь интервала дискретности Δt_A с характеристической частотой ω_0 в форме

$$\omega_0 = \arg\{(\Delta\omega(\omega_0)) \leq \pi/(\Delta t_A)\} = \arg\{2\omega_0 \leq \pi/(1,2 \cdot 10^{-4})\} \approx 1,3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

5.3.6. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего длительность переходного процесса t_n и добротности по скорости D с характеристической частотой ω_0 в форме $t_n = 7,8/\omega_0$, $D = 0,25\omega_0$, а также результатов предыдущего пункта оценить предельно достижимые значения $t_n = 7,8/\omega_0 = 7,8/(1,3 \cdot 10^4) = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ и $D = 0,25\omega_0 = 0,25 \cdot (1,3 \cdot 10^4) = 3,25 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ с используемым СВ.

Вариант 5.4. (SB – CAN, $L_k = 5000 \text{ м}$)

5.4.1. Используемый последовательный интерфейс – CAN с характеристиками:

– обмен информацией – полудуплексный;

– пропускная способность – $10 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}$.

– помехозащита – технологией CRC с образующим полиномом $g(x) = x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$ ($m = 15$) в режиме обнаружения;

– синхронизация – скремблирование.

5.4.2. Формирование формата ПЗК дает код $(n_c, k_c) \Big|_{k_c=n_d=12; n_c=k_c+m=28} = (27, 12)$.

5.4.3. Вычисление длительности бита Δt_b передачи последовательного кода, определяемого скоростью

$C = 10^4 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$ МК, дающее значение $\Delta t_b = 10^{-4} \text{ с}$.

5.4.4. Вычисление Δt_A с помощью (12) приводит к значению $\Delta t_A = \Delta t_A(\Delta t_b, n_c) = \Delta t_A = 2\Delta t_b(n_c + 3) = 2 \cdot 30 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

5.4.5. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего полосу пропускания ПММ с характеристической частотой в форме $(\Delta\omega(\omega_0)) = \arg(M(\omega) = 0,05) = 2\omega_0$, и теоремы Котельникова–Шеннона зафиксировать связь интервала дискретности Δt_A с характеристической частотой ω_0 в форме

$$\omega_0 = \arg\{(\Delta\omega(\omega_0)) \leq \pi/(\Delta t_A)\} = \arg\{2\omega_0 \leq \pi/(6 \cdot 10^{-3})\} \approx 262 \text{ с}^{-1}.$$

5.4.6. На основании свойства ПММ порядка $n_A = n + 2 = 4$ с распределением корней характеристического полинома Ньютона, связывающего длительность переходного процесса t_n и добротности по скорости D с характеристической частотой ω_0 в форме $t_n = 7,8/\omega_0$, $D = 0,25\omega_0$, а также результатов предыдущего пункта оценить предельно достижимые значения $t_n = 7,8/\omega_0 = 7,8/262 \approx 0,03 \text{ с}$ и $D = 0,25\omega_0 = 0,25 \cdot 262 = 65,5 \text{ с}^{-1}$ с используемым СВ.

Заключение

В работе предложен алгоритм синтеза цифрового управления непрерывными техническими объектами при использовании последовательного интерфейса. В его основе лежит переход от параллельной передачи сигнала к последовательной, повлекший за собой ряд системных проблем, таких как увеличе-

ние размерности дискретной модели непрерывного технического объекта и длительности интервала дискретности обмена информацией, причем современные технологии CRC-типа, предназначенные для обеспечения помехоустойчивости передачи, приводят к дополнительному увеличению этого интервала. Таким образом, фактор аппаратной среды передачи сигнала управления объекту в теории и практике дискретных систем должен в обязательном порядке учитываться при формировании алгоритма их синтеза.

References

1. Tou J.T. *Modern Control Theory*. NY, McGraw-Hill, 1964, 343 p.
2. Iserman R. *Digital Control Systems*. Berlin, Springer, 1981.
3. Grigor'ev V.V., Drozdov V.N., Lavrent'ev V.V., Ushakov A.V. *Sintez Diskretnykh Sistem Regulyatorov pri Pomoshchi EVM* [Synthesis of Digital Systems Using Computer Controls]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983, 245 p.
4. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. Wiley-Interscience, 1972, 608 p.
5. Ivanov V.A., Golovanov M.A. *Teoriya Diskretnykh Sistem Avtomaticheskogo Upravleniya: Uchebnoe Posobie po Kursu "Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya"* [Theory of Discrete Automatic Control Systems: a Manual for the Course "Automatic Control Theory"]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2013, 160 p.
6. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, SIAM, 1994, 193 p.
7. Ushakov A.V., Bystrov P.S., Nuiya (Osiptseva) O.S. *Tsifrovoye Distantionnoye Upravlenie: Setevye Tekhnologii i Algoritmy* [Digital Remote Control: Network Technologies and Algorithms]. Saarbrucken, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 365 p.
8. Ushakov A.V., Yaitskaya E.S. Formation of the algorithmic recursive correction for systematic codes multiple errors based on quasi-syndromes in the rate of hardware time. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 2 (78), pp. 37–42. (in Russian)
9. Liholetova E.S., Nuiya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Factors of the channel medium, problem of digital remote control of continuous technological resources. *Proc. 3rd Int. Conf. on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications*. Florence, 2014, pp. 68–72.
10. Lunt B.D. *USB: The Universal Serial Bus*. Create Space Independent Publishing Platform, 2012, 580 p.
11. Sokolov V.F. Control-oriented model validation and errors quantification in the ℓ_1 setup. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, vol. 50, no. 10, pp. 1501–1508. doi: 10.1109/TAC.2005.856646
12. Blevins T.L., McMillan G.K., Wojsznis W.K., Brown M.W. *Advanced Control Unleashed*. North Carolina, ISA, 2003, 434 p.
13. Ushakov A., Dudarenko N., Slita O. *Sovremennaya Teoriya Mnogomernogo Upravleniya: Apparat Prostranstva Sostoyanii* [Modern Theory of Multivariable Control: The Unit of the State Space]. Saarbrucken, LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 428 p.
14. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
15. *Codes, Systems and Graphical Models* / Eds. B. Marcus, J. Rosenthal. NY, Springer-Verlag, 2001, vol. 123, pp. 239–264. doi: 10.1007/978-1-4613-0165-3

- Нуйя Ольга Святославовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, olga.nuyya@gmail.com
- Пещеров Руслан Олегович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, rpeshcherov@mail.ru
- Ушаков Анатолий Владимирович** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ushakov-AVG@yandex.ru
- Olga S. Nuyya** – PhD, Associate professor, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, olga.nuyya@gmail.com
- Ruslan O. Peshcherov** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, rpeshcherov@mail.ru
- Anatoliy V. Ushakov** – D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Ushakov_AVG@yandex.ru