

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С КОНКУРИРУЮЩИМ МЕТОДОМ ДОСТУПА

В.К. Битюков, А.Е. Емельянов

*Кафедра «Информационные и управляющие системы»,
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий», г. Воронеж; emalexeg@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко

Ключевые слова и фразы: запаздывание; конкурирующий доступ; сетевая система управления; устойчивость.

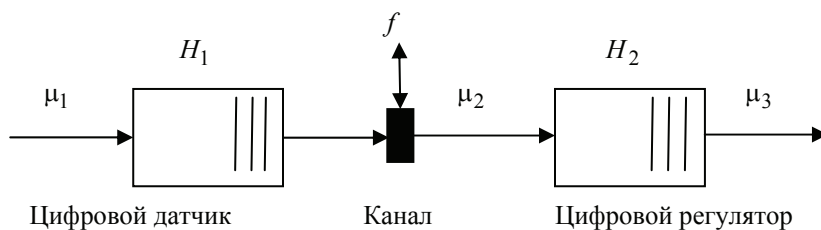
Аннотация: Проведен качественный анализ процесса передачи данных по каналам с конкурирующим методом доступа и его влияние на функционирование сетевой системы управления. Доказано, что запаздывание в системе управления определяется наличием буферов данных цифрового датчика и регулятора и с течением времени не уменьшается.

Особенность функционирования сетевых систем управления (ССУ), использующих для передачи информации между элементами системы каналы, реализующие конкурирующий метод доступа, заключается в недетерминированном характере времени передачи данных [1]. Исследование влияния параметров такой передачи данных на качество работы системы управления позволит сформулировать рекомендации по повышению эффективности работы данной системы [2, 3]. Однако точный анализ влияния недетерминированности времени передачи данных на характеристики системы управления представляется затруднительным. Рассмотрим качественный анализ влияния процесса передачи данных по каналам с конкурирующим методом доступа на функционирование ССУ.

Рассмотрим ССУ, в которой передача данных по каналу с конкурирующим методом доступа (ККМД) осуществляется между цифровым датчиком (ЦД) и цифровым регулятором (ЦР).

Выделим ту часть системы управления, которая участвует в формировании, передаче и переработке информации, и рассмотрим ее отдельно.

На рисунке представлена структурная схема этой части системы.



**Структурная схема части системы управления,
участвующей в формировании, передаче и переработке информации**

В данную часть системы входят: часть ЦД, которая представлена буфером данных H_1 ; ККМД; часть ЦР, представленная буфером данных H_2 .

Влияние ККМД на процесс передачи данных в рассматриваемой ССУ проявляется в том, что он некоторое время обслуживает передачу данных от других ССУ. Этот промежуток времени носит случайный характер. Поэтому, для данной ССУ этот момент можно рассматривать как закрытие ККМД для передачи данных на случайный промежуток времени. На представленном рисунке такое закрытие-открытие ККМД моделируется помехой f .

Рассмотрим более подробно процесс передачи данных по ККМД.

В буфер данных ЦД поступает информация от другой части ЦД, которая в определенные моменты времени считывает информацию с выхода объекта управления, преобразует, обрабатывает и формирует пакет данных для дальнейшей передачи. Этот пакет может быть сразу отправлен на ЦР, если в буфере ЦД нет других пакетов и ККМД свободен от помехи f . В противном случае он помещается в очередь в буфер ЦД. Как только ККМД освободится от помехи f , начнется последовательная передача данных из буфера ЦД в ЦР. Поступившие данные в ЦР помещаются в буфер, откуда последовательно перерабатываются в моменты выработки управляющего воздействия на объект управления. В дальнейшем будем считать, что объем буферов ЦД и ЦР неограничен.

Обозначим через μ_1 , μ_2 , μ_3 интенсивности формирования, передачи и переработки информации соответственно. Необходимо различать соответствующие интенсивности и скорости формирования, передачи и переработки. Скорость формирования, передачи и переработки обозначим как V_1 , V_2 и V_3 соответственно. В дальнейшем будем считать, что $V_1 = V_3 = \infty$ пакет/с. То есть формирование пакета данных и его переработка происходят мгновенно.

Рассмотрим функционирование системы при различных соотношениях μ_1 , μ_2 и μ_3 . Будем анализировать только те варианты, которые имеют практический интерес.

Режим передачи данных в реальной сетевой системе управления соответствует следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \text{const} < V_2; \\ \mu_2 &= \begin{cases} V_2, & \text{если } H_1 \neq 0; \text{ канал открыт;} \\ \mu_1, & \text{если } H_1 = 0 \text{ и канал открыт;} \\ 0, & \text{если канал закрыт.} \end{cases} \\ \mu_3 &= \begin{cases} \mu_1, & \text{если } H_2 \neq 0; \\ \mu_1, & \text{если } H_2 = 0 \text{ и канал открыт;} \\ 0, & \text{если } H_2 = 0 \text{ и канал закрыт.} \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь и далее через H_1 и H_2 обозначено количество информации, находящейся в буферах ЦД и ЦР соответственно.

Учет влияния помехи f на ККМД произведем следующим образом. В случайные моменты времени t_i канал закрывается на случайный промежуток времени τ_i . Временной интервал открытия канала между двумя последовательными закрытиями обозначим через λ_i .

Проведем анализ описанного режима передачи данных и его влияния на работу сетевой системы управления. Рассмотрим несколько частных случаев влия-

ния помехи f на ККМД. Пусть закрытие и открытие канала передачи происходят регулярно. Кроме того, время закрытия $\tau = \text{const}$ и время открытия канала $\lambda = \text{const}$.

Введем следующее обозначение

$$m = \frac{\tau}{\lambda}.$$

Тогда, в зависимости от значения отношения V_2/μ_1 , можно выделить три режима работы сетевой системы управления.

Режим 1. Для данного режима выполняется условие

$$1 < V_2/\mu_1 < (m + 1).$$

Рассмотрим изменения количества информации H_1 и H_2 в буферах ЦД и ЦР.

Пусть в момент времени t_0 $H_1 = 0$ и $H_2 = 0$, канал передачи открыт. В момент времени t_1 канал передачи закрывается на время $\tau = t_2 - t_1$, где t_2 – время открытия канала. За время закрытия канала в буфере ЦД накопится объем информации

$$H_1 = \mu_1 \tau.$$

Цифровой регулятор за время τ не будет иметь информации от ЦД для формирования управляющего воздействия, так как $H_2 = 0$.

Определение 1. *Разрывом информационного потока* называется случай, когда ЦР некоторое время не имеет информации от ЦД для выработки управляющего воздействия.

Хотя система управления только в моменты квантования получает информацию, и именно в эти моменты является замкнутой, а в промежутках между моментами квантования – разомкнутой, мы в дальнейшем будем понимать следующее: если система управления работает в режиме, при котором в буфере ЦР имеется информация для выработки управляющего воздействия, то будем считать информационный поток в системе непрерывным, а саму систему – замкнутой; если же в момент выработки управляющего воздействия в буфере ЦР нет информации, то будем считать, что имеется разрыв информационного потока, а систему управления – разомкнутой. Таким образом, может возникнуть такая ситуация: канал передачи данных закрыт, но в свете введенного выше определения, система управления будет считаться замкнутой, а информационный поток – непрерывным.

В момент времени t_2 канал открывается и остается в таком состоянии в течение промежутка времени λ , до момента времени t_3 , когда канал закрывается.

Тогда количество информации H_1 в буфере ЦД в момент времени t_3 составит

$$H_1 = \tau\mu_1 + \lambda\mu_1 - \lambda V_2 = [(m + 1) - V_2/\mu_1] \lambda\mu_1.$$

Количество информации H_2 в буфере ЦР

$$H_2 = \lambda V_2 - \lambda\mu_1.$$

Общее количество информации в системе

$$H = H_1 + H_2 = \tau\mu_1.$$

Следовательно, в момент времени t_3 система управления работает с запаздыванием

$$\tau_c = \frac{H}{\mu_1} = \frac{\tau\mu_1}{\mu_1} = \tau.$$

Отметим, что система управления начала работать с запаздыванием τ с момента времени t_2 . До этого момента в системе наблюдался разрыв информационного потока. Таким образом, с каждым циклом $(\tau + \lambda)$ в буфере ЦД количество информации будет увеличиваться. А значит растет запаздывание в системе управления, что может привести к неустойчивости этой системы. При этом за время λ количество информации в буфере ЦР растет, но за время $\tau_0 < \tau$, когда канал закрыт, это количество информации перерабатывается. Количество информации H_2 в буфере ЦР за время λ равно

$$H_2 = \lambda(V_2 - \mu_1).$$

За время $\tau_0 < \tau$ $H_2 = 0$. Отсюда

$$H_2 = (V_2 - \mu_1)\lambda - \mu_1\tau_0 = 0;$$

$$\tau_0 = \frac{(V_2 - \mu_1)\lambda}{\mu_1}.$$

В оставшееся время $\Delta\tau = \tau - \tau_0$ в системе наблюдается разрыв информационного потока.

Рассмотрим следующий случай.

Пусть система управления работает время t . В начальный момент времени система не имеет запаздывания. Количество информации в системе на момент времени t составит

$$H = H_1 + H_2 = t\mu_1 - t\mu_3.$$

Пусть в течение этого времени суммарное время разрыва информационного потока составило τ .

Тогда

$$H = t\mu_1 - (t - \tau)\mu_1 = \mu_1\tau.$$

Следовательно, время запаздывания в системе управления на момент времени t

$$\tau_c = \frac{H}{\mu_1} = \frac{\tau\mu_1}{\mu_1} = \tau,$$

где

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i,$$

τ_i – i -й промежуток времени разрыва информационного потока; n – количество разрывов информационного потока за время t .

Таким образом, доказана следующая теорема.

Теорема 1. Время запаздывания в сетевой системе управления равно суммарному времени разрыва информационного потока.

Таким образом, в системе, работающей в режиме 1, с каждым последующим закрытием канала будет наблюдаться разрыв информационного потока в течение времени $\Delta\tau$, и, на основании теоремы 1, на этот промежуток будет возрастать время запаздывания τ_c в системе управления.

Время запаздывания в системе управления, работающей в режиме 1, на момент времени t будет равно

$$\tau_c = \tau + (k - 1)\Delta\tau,$$

где k – число закрытий канала за время t .

Следовательно, запаздывание в системе управления в режиме 1 возрастает с течением времени до бесконечности. Необходимо отметить, что беспредельное увеличение времени запаздывания в системе управления достигается и при достаточно малом промежутке времени закрытия канала τ .

Анализ работы системы управления для рассматриваемого случая позволяет выделить два понятия: запаздывание в канале передачи и запаздывание в системе управления.

Определение 2. *Запаздыванием в канале передачи данных* называется промежуток времени, в течение которого передача по нему невозможна.

Невозможность передачи данных по каналу обуславливается воздействием на него помехи f , приводящей к закрытию канала передачи.

Определение 3. *Запаздыванием в системе управления* называется промежуток времени с момента формирования пакета данных до момента его переработки.

Понятно, что запаздывание в системе управления складывается из времени ожидания пакета передачи в буферах ЦД и ЦР.

Докажем следующую теорему.

Теорема 2. Если за рассматриваемый промежуток времени t разрыва информационного потока в сетевой системе управления не наблюдалось, то время запаздывания в системе в течение этого же промежутка времени не изменялось.

Доказательство. Пусть в системе управления имеется запаздывание τ_c . В течение последующего времени t в системе разрыва информационного потока не наблюдается. Следовательно, изменение количества информации H в системе за рассматриваемый промежуток времени составляет

$$\Delta H = t\mu_1 - t\mu_3 = t\mu_1 - t\mu_1 = 0.$$

Изменение времени запаздывания в системе управления

$$\Delta\tau_c = \frac{\Delta H}{\mu_1} = 0.$$

Таким образом, время запаздывания в системе управления не изменяется. Теорема доказана.

Режим 2. Для данного режима выполняется условие

$$V_2/\mu_1 = m + 1.$$

Рассмотрим изменения количества информации H_1 и H_2 в буферах ЦД и ЦР.

Пусть в момент времени t_0 $H_1 = 0$ и $H_2 = 0$ канал передачи открыт. В момент времени t_1 канал передачи закрывается на время $\tau = t_2 - t_1$, где t_2 – время открытия канала.

Тогда за время τ

$$H_1 = \mu_1\tau;$$

$$H_2 = 0.$$

В момент времени t_3 канал открывается на время λ .

Тогда в момент $t_4 = t_3 + \lambda$ имеем:

$$H_1 = \tau\mu_1 + \lambda\mu_1 - \lambda V_2 = 0;$$

$$H_2 = \lambda V_2 - \lambda\mu_1 = \tau\mu_1.$$

В момент времени t_4 канал закрывается на время τ . Тогда в момент времени $t_5 = t_4 + \tau$:

$$H_1 = \mu_1\tau;$$

$$H_2 = \tau\mu_1 - \tau\mu_1 = 0.$$

Таким образом, начиная с момента времени t_2 система управления работает с постоянным запаздыванием

$$\tau_c = \frac{H}{\mu_1} = \frac{H_1 + H_2}{\mu_1} = \frac{\tau\mu_1}{\mu_1} = \tau$$

и без разрывов информационного потока.

Режим 3. Для данного режима выполняется условие

$$V_2/\mu_1 > m + 1.$$

В этом случае, за время τ буфер ЦД накапливает информацию

$$H_1 = \mu_1\tau.$$

А за время $\lambda_0 < \lambda$, буфер ЦД полностью освобождается от содержащегося в нем объема информации

$$H_1 = \tau\mu_1 + \lambda_0\mu_1 - \lambda_0 V_2 = 0;$$

$$\lambda_0 = \frac{\tau\mu_1}{V_2 - \mu_1}.$$

Оставшееся время $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ канал передачи данных работает с интенсивностью μ_1 . Пакет данных, сформировавшийся в ЦД, проходит сразу в канал передачи и далее в ЦР, не задерживаясь в буфере ЦД. Тогда изменение количества информации в буфере ЦР будет выглядеть следующим образом.

За время λ_0 буфер ЦР накапливает информацию

$$H_2 = \lambda_0 V_2 - \lambda_0 \mu_1 = \lambda_0 (V_2 - \mu_1) = \tau\mu_1.$$

За последующий промежуток времени $\Delta\lambda$ количество информации в буфере ЦР не изменяется

$$H_2 = \tau\mu_1 + \Delta\lambda\mu_1 - \Delta\lambda\mu_1 = \tau\mu_1.$$

За следующий промежуток времени закрытия канала τ буфер ЦР полностью освободится от имеющегося в нем объема информации. Следовательно, в рассматриваемом режиме система управления работает следующим образом: при первом закрытии канала наблюдается разрыв информационного потока на время τ , далее система управления работает без разрывов информационного потока, но с постоянным запаздыванием

$$\tau_c = \frac{H}{\mu_1} = \frac{H_1 + H_2}{\mu_1} = \frac{\tau\mu_1}{\mu_1} = \tau.$$

Реальный режим работы сетевой системы управления можно представить соответствующей комбинацией основных режимов 1, 2 и 3, которые сменяют друг друга по какому-то заранее заданному закону или случайным образом. В каждый момент времени t система находится в одном из основных режимов.

При заданных μ_1 и V_2 режим работы системы управления зависит от параметра $m = \frac{\tau}{\lambda}$. Но даже в условиях одного режима параметр m может изменяться.

Влияние этого параметра на работу системы управления устанавливается с помощью следующих теорем.

Теорема 3. Если сетевая система управления работает с постоянным временем запаздывания τ_c , то увеличение времени открытия канала передачи λ не влияет на величину τ_c .

Доказательство. Увеличение времени открытия канала передачи λ не приводит к разрыву информационного потока системы. Это очевидно, так как при открытом канале передачи пакеты данных от ЦД беспрепятственно поступают на ЦР, и в ЦР всегда есть информация от ЦД для выработки управляющего воздействия. Следовательно, согласно теореме 2, время запаздывания в системе управления не изменяется. Теорема доказана.

Теорема 4. Если сетевая система управления работает с постоянным временем запаздывания τ_c , то уменьшение времени закрытия канала τ не изменяет времени τ_c .

Доказательство. Работа системы с постоянным временем запаздывания τ_c говорит о том, что общий объем информации в буферах H_1 и H_2 равен $\mu_1 \tau_c$

$$H = H_1 + H_2 = \mu_1 \tau_c.$$

Если закрытие канала уменьшится, например, на величину $\Delta\tau$, то в момент открытия канала объем информации H_1 в буфере ЦД будет меньше на величину $\mu_1 \Delta\tau$, а объем информации H_2 в буфере ЦР будет больше на ту же величину. Следовательно, общий объем информации H в системе управления не изменится и время запаздывания τ_c останется прежним. Теорема доказана.

Следствием теорем 3 и 4 является теорема 5.

Теорема 5. Если сетевая система управления работает с постоянным временем запаздывания τ_c , то уменьшение параметра $m = \frac{\tau}{\lambda}$ не изменяет времени τ_c .

Теорема 6. Если система управления работает с постоянным временем запаздывания τ_{c0} , то увеличение времени закрытия канала передачи так, что $\tau > \tau_{c0}$, приводит к увеличению времени запаздывания, причем $\tau_c = \tau$.

Доказательство. Если система управления работает с запаздыванием τ_{c0} , то закрытие канала передачи на τ_{c0} не приводит к разрыву информационного потока системы. В момент открытия канала количество информации H_2 в буфере ЦР равно нулю. Поэтому, если закрытие канала передачи $\tau > \tau_{c0}$, то на время $\Delta\tau = \tau - \tau_{c0}$ наблюдается разрыв информационного потока. Тогда, согласно теореме 1, время запаздывания в системе управления составит $\tau_c = \tau_{c0} + \Delta\tau = \tau$. Теорема доказана.

Теорема 7. Если система управления работает только в режимах 2 и 3, которые могут сменять друг друга произвольным образом, то время запаздывания τ_c в системе на момент времени t равно максимальному времени τ закрытия канала передачи за данный промежуток времени.

Эта теорема является следствием теоремы 6.

Теорема 8. Запаздывание в сетевой системе управления не уменьшается.

Доказательство. Пусть в данный момент система управления имеет время запаздывания τ_c . При дальнейшем функционировании системы возможны следующие случаи: 1) время закрытия канала передачи увеличилось; 2) время закрытия канала передачи уменьшилось; 3) время открытия канала передачи увеличилось; 4) время открытия канала передачи уменьшилось. Рассмотрим возможные случаи отдельно. Согласно теореме 5, случаи 1 и 3 не изменяют время запаздывания системы. Согласно теореме 4, случай 2 не изменяет время запаздывания системы управления. Рассмотрим случай 4. Если система управления работает в режиме 1, то уменьшение времени открытия канала передачи не выводит систему из этого режима. А в режиме 1, как это было показано выше, время запаздывания с течением времени увеличивается. Если система управления работает в режиме 2, то уменьшение времени открытия канала передачи переводит систему в режим 1. Следовательно, время запаздывания в системе управления будет увеличиваться. Если система управления работает в режиме 3, а уменьшение времени открытия канала приводит к переходу системы в режим 1 работы, то время запаздывания в системе будет увеличиваться. Если уменьшение времени открытия канала не нарушает условие для работы в режиме 3 или приводит к переходу системы в режим 2, то запаздывание в системе управления не изменяется.

Теорема доказана.

Основные результаты проведенного анализа:

1. В каждый момент времени сетевая система управления находится в одном из режимов: 1, 2 или 3.
2. Сетевая система управления работает с запаздыванием в цепи обратной связи.
3. С течением времени запаздывание в системе управления не уменьшается.
4. В процессе функционирования сетевой системы управления наблюдаются разрывы информационного потока, вследствие которых запаздывание в системе управления увеличивается.
5. Условия возникновения разрыва информационного потока зависят как от предыстории процесса функционирования системы, так и от промежутков времени открытия и последующего закрытия канала передачи, что приводит к необходимости знания законов распределения вероятностей этих величин.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы».

Список литературы

1. Кругляк, К. Локальные сети Ethernet в АСУТП: быстрее, дальше, надежнее / К. Кругляк // Современ. технологии автоматизации. – 2003. – № 1. – С. 6–13.
2. Абрамов, Г.В. Математическое моделирование цифровых систем управления с передачей информации по каналам множественного доступа / Г.В. Абрамов, А.Е. Емельянов, М.Н. Ивлиев // Системы упр. и информ. технологии. – 2007. – № 3 (29). – С. 27–32.
3. Абрамов, Г.В. Определение закона распределения времени обслуживания заявки информационной системы с множественным доступом к каналу передачи /

Qualitative Analysis of Network Control System with Competing Access Mode

V.K. Bityukov, A.E. Emelyanov

*Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh;
emalexeg@yandex.ru*

Key words and phrases: competing access; delay; network control system; stability.

Abstract: The qualitative analysis of data transmission on the channels with competing access mode and its influence on functioning of network control system is carried out. It is proved that the delay in the control system is caused by data buffers of the digital gage and the regulator, and it doesn't decrease over time.

Qualitätsanalyse des Funktionierens des Netzsystems der Steuerung mit der konkurrierenden Zutrittsmethode

Zusammenfassung: Es ist die Qualitätsanalyse des Prozesses der Angabenerübergabe nach den Kanälen mit der konkurrierenden Zutrittsmethode und ihre Einwirkung auf das Funktionieren des Netzsystems der Steuerung durchgeführt. Es ist festgestellt, dass die Verspätung im System der Steuerung durch das Vorhandensein der Datenpuffer des Digitalensors und des Regulators bestimmt wird und mit der Zeit nicht verringert wird.

Analyse qualitative du fonctionnement du système de réseau de la commande avec une méthode concurrente de l'accès

Résumé: Est effectuée une analyse qualitative du processus de la transmission des données par les chaînes avec une méthode concurrente de l'accès et son influence sur le fonctionnement du système de réseau de la commande. Est prouvé que le retard dans le système de la commande n'est pas déterminé par la présence des tampons des données du capteur numérique et du régulateur et ne diminue pas avec le temps.

Авторы: *Битюков Виталий Ксенофонтович* – доктор технических наук, профессор, президент ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой «Информационные и управляющие системы»; *Емельянов Александр Егорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж.

Рецензент: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, проректор по научно-инновационной деятельности, профессор кафедры «Технологии продовольственных продуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
