

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ
ЗАМКНУТОГО КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ
ТРУБОПРОВОДА ПОД УПРАВЛЕНИЕМ КОНТРОЛЛЕРА «ОВЕН ПЛК100 220»**

А. О. Калинин*, М. В. Посконин, М. В. Сарамуд, В. В. Лосев, И. В. Ковалев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: andrey.kalinin@phkp.ru

Рассматривается проблема временных задержек при передаче информации от первичного преобразователя к управляющему органу в автоматических системах управления технологическими процессами. В настоящее время отсутствуют методики оценки влияния временных задержек информационного сигнала на время реакции контура регулирования, что приводит к неэффективному использованию ресурсов систем. Увеличенный временной интервал между изменением технологического параметра и управляющим воздействием также может привести к негативным последствиям. В качестве инструмента для исследования системы выбрана параметрическая идентификация отдельных узлов с последующим составлением циклограммы замкнутого контура регулирования. В процессе синтеза циклограммы временных задержек производится разделение структурной схемы контура регулирования на две составные части: регулятивную (отображает элементы рассматриваемого контура регулирования, непосредственно участвующие в технологическом процессе) и информативную (отображает элементы, не влияющие на процесс автоматического регулирования технологического параметра) карты прохождения сигнала. Разделение на элементы, относящиеся к регулятивной или информативной карте, производится на основании влияния на суммарное время реакции системы рассматриваемого контура автоматического регулирования. Учитывая технические параметры каждого узла регулятивной карты и общей технической документации, составляется функциональная схема временных задержек каждого элемента в виде графического изображения (циклограммы). Исходя из полученных моделей составляются две циклограммы с максимальным и минимальным быстродействием рассматриваемого контура регулирования путем смещения моделей элементов относительно друг друга. В качестве примера приведен расчет отдельного контура регулирования давления воздуха в трубопроводе, состоящего из первичного преобразователя «МЕТРАН 100 ДИ 1051», устройства связи с объектом (УСО) «ЭЛЕМЕР EL 4019», программируемого логического контроллера «ОВЕН ПЛК100 220», УСО «ЭЛЕМЕР EL 4024», исполнительного механизма МЭО-6,3/20-0,63-01, обеспечение связи между контроллером и УСО осуществляется при помощи сетевого интерфейса RS485 (протокол MODBUS RTU).

Ключевые слова: время реакции системы, временные задержки, параметрическая идентификация, циклограммы регулятивной карты прохождения сигнала.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 2, P. 387–395

**METHODS FOR CALCULATING THE TIME CHARACTERISTICS OF THE ELEMENTS
OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM ON THE EXAMPLE OF A CLOSED LOOP
FOR REGULATING THE PRESSURE IN A PIPELINE SECTION UNDER THE CONTROL
OF THE “OWEN PLC100 220”**

A. O. Kalinin*, M. V. Poskonin, M. V. Saramud, V. V. Losev, I. V. Kovalev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: andrey.kalinin@phkp.ru

This article deals with the problem of time delays in the transmission of information from the primary drive to the governing body with automatic process control systems. Nowadays there are no methods which check the effect of time delays of the information signal on the loop response time, which leads to an inefficient use of system resources. The longer time interval between the change in process variable and control can also lead to negative consequences. As a tool for the study of the system the parametric identification of each selected component followed by drawing a time sequence diagram is used. During the synthesis of the sequence diagrams of time delays, the structural diagram

of the control loop is separated into two components: regulative (displays the elements of the control loop directly involved in the process) and informative (maps elements that do not affect the process of automatic adjustment of the process parameter). Separation of the elements related to regulatory or informative map is based on the effect on the total time under consideration of automatic control loop system response. Taking into account the technical parameters of each node of the regulatory chart and the general technical documentation, a model of the functioning of each element in the form of a graphic image (sequence diagrams) is compiled. Based on the models obtained, two sequence diagrams are compiled with the maximum and minimum speed of the control loop under consideration, by shifting the model of elements relative to each other. As an example, there is a calculation of a separate air pressure control loop in the pipeline, consisting of: a "METRAN 100 DIO 1051" primary transducer, an object communication device (UCO) "ELEMER EL 4019", a programmable logic controller "OWEN PLC 100 220", a UEL "ELEMER EL 4024", 6.3 / 20-0.63-01, the communication between the controller and the USO is carried out using the RS485 network interface (MODBUS RTU protocol).

Keywords: system reaction time, time delays, parametric identification, sequence diagrams of the regulatory signal transmission map.

Введение. В процессе эксплуатации автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) могут возникать аварийные ситуации, имеющие глобальные негативные последствия, такие как повреждение узлов оборудования, брак, причинение вреда здоровью человека и окружающей среде [1]. Зачастую это связано с несвоевременной реакцией системы автоматического управления на происходящие изменения критических параметров в технологическом процессе. Причиной тому является отсутствие методологии анализа временных характеристик АСУ ТП. Современный уровень развития технических систем вызывает необходимость решения как теоретических, так и практических задач идентификации состояния отдельных элементов системы и каналов передачи информации [2]. Однако при изучении структурно сложных объектов нерационально анализировать весь объем информации о системе. При текущем уровне автоматизации объем информации об изучаемой системе чрезмерен [3], тогда как в критически важных процессах участвует лишь ограниченное число контуров управления.

Системный подход к разработке математической модели предполагает единый подход к описанию всего тракта преобразования и передачи информации, начиная с первичного преобразователя, воспринимающего непрерывную измеряемую величину, и заканчивая устройствами цифровой обработки информации и устройствами регулирования [4]. Анализировать рационально лишь контуры автоматического регулирования критических параметров, как на стадии проектирования, так и в уже действующих АСУ ТП. Перечень критических параметров определяется индивидуально для рассматриваемого технологического процесса. Каждый контур автоматического регулирования критического параметра рассматривается индивидуально.

Характерные особенности задачи идентификации в этом случае связаны с наличием обратной связи (ОС), устанавливающей причинно-следственную связь между выходом объекта и входным управляющим воздействием на объект. Применение в этих условиях методов пассивной идентификации без учета влияния обратной связи приводит к неверным результатам или порождает неоднозначность решения задачи иденти-

фикации, что приводит к необходимости использования алгоритма параметрической идентификации, учитывающего влияние ОС [5; 6].

Рассмотрим расчет временных задержек для замкнутого контура регулирования давления жидкости в трубопроводе (рис. 1).

Анализ структурной схемы. Введем понятие «карта прохождения сигнала». Это полный путь, который пройдет сигнал, сформированный первичным преобразователем.

Исходя из структурной схемы, карту прохождения каждого сигнала [7] можно разделить на две части:

- регулятивная карта прохождения сигнала (РКС) – включает в себя устройства и сети от первичного преобразователя до исполнительного механизма, наличие которых приводит к увеличению времени реакции контура регулирования;

- информативная карта прохождения сигнала (ИКС) – включает в себя остальные устройства и сети, предназначенные для обработки, хранения, отображения и передачи сигнала, не влияющие на время реакции контура регулирования.

На основании этого объектом для анализа вероятностно-временной характеристики является регулятивная карта прохождения сигнала (РКС).

В результате анализа РКС можно:

- установить недостатки контура автоматического регулирования технологического параметра на стадии проектирования (неподходящий протокол связи, устройство с низким быстродействием, неоптимизированная конфигурация сети и т. д.);

- произвести изменения в уже имеющуюся АСУ ТП для предотвращения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций;

- определить функциональные зависимости между допустимыми величинами критических параметров и временем реакции системы, которые способна компенсировать АСУ ТП без наступления негативных последствий.

Состав РКС может быть различным и включать в себя разное число устройств и сетей связи.

1. Первичный преобразователь. По типу формирования сигнала на выходе первичные преобразователи можно разделить на две группы.

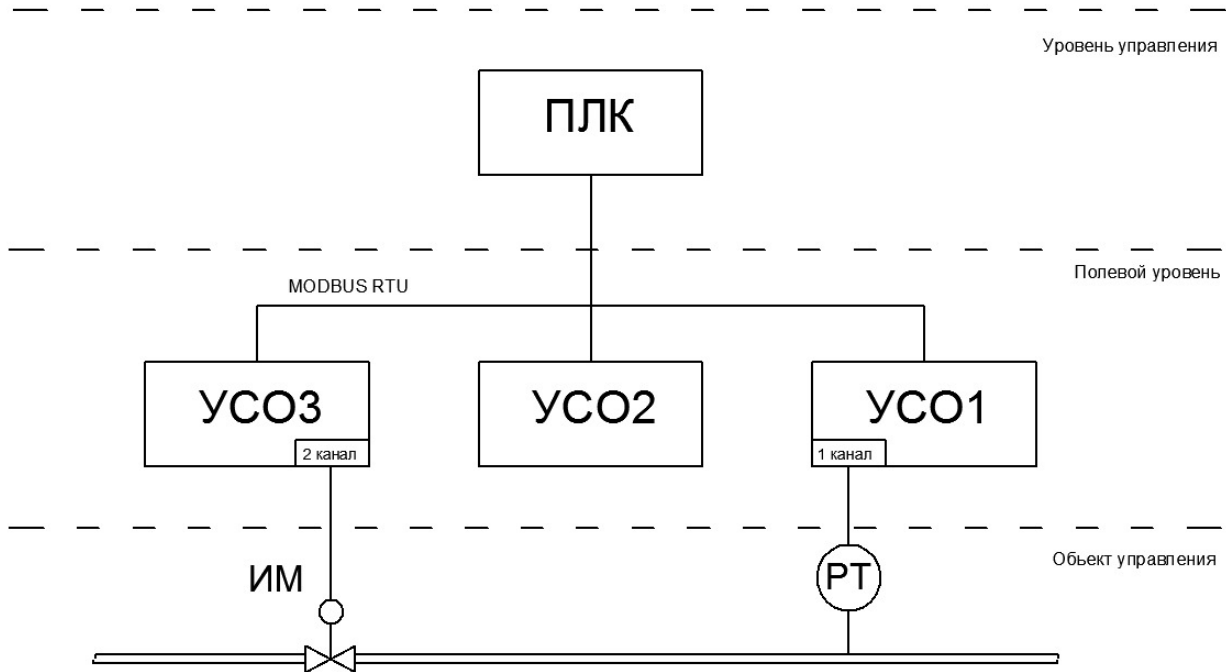


Рис. 1. Структурная схема замкнутого контура регулирования давления жидкости в трубопроводе: РТ – датчик давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051»; УСО1, УСО2 – устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4019»; УСО3 – устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4024»; ПЛК – контроллер «ОВЕН ПЛК100-220»; ИМ – исполнительный механизм МЭО-6,3/20-0,63-01

Fig. 1. Structural diagram of a closed loop for regulating the pressure in a pipeline section: РТ – pressure sensor “METRAN-100-DI-1051”; УСО1, УСО2 – communications device with the item “ELEMER-EL-4019”; УСО3 – communications device with the item “ELEMER-EL-4024”; ПЛК – controller “OWEN PLK100-220”; ИМ – executive device ME0-6,3/20-0,63-01

1.1. Преобразователь без электронно-цифровых узлов с непрерывным формированием сигнала. Сам сигнал по роду может быть аналоговым или дискретным. Принимаем

$$T_{\text{пп. уст}} = 0 \text{ с,}$$

где $T_{\text{пп. уст}}$ – время установления выходного сигнала первичного преобразователя, с.

1.2. Преобразователь с электронно-цифровыми узлами формирования сигнала. Сигнал на выходе по роду может быть как цифровым, так и аналоговым или дискретным, однако его изменение происходит с некоторой задержкой, которая возникает в результате обработки и формирования сигнала в электронном блоке:

$$T_{\text{пп. уст}} = T_{\text{пс}} + T_{\text{эб}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пс}}$ – время переходного процесса сенсора, с; $T_{\text{эб}}$ – время задержки электронного блока, с.

Время задержки электронного блока определяется по формуле

$$T_{\text{эб}} = t_{\text{д}} + \tau, \quad (2)$$

где $t_{\text{д}}$ – время демпфирования, с; τ – время цикла измерения датчика, с.

2. Устройство связи с объектом (УСО). По типу опроса / вывода информации можно выделить:

2.1. УСО с последовательным опросом каналов. Опрос каналов либо вывод информации производится

последовательно один за другим. Таким образом, время задержки сигнала в УСО ($T_{\text{усо}}$) будет определяться по формуле

$$T_{\text{усо}} = N_{\text{кн}} \cdot T_{\text{кн}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{кн}}$ – количество каналов, шт; $T_{\text{кн}}$ – время опроса одного канала, с.

2.2. УСО с параллельным опросом каналов. Опрос всех каналов происходит одновременно, соответственно $T_{\text{усо}} = T_{\text{опр}}$, где $T_{\text{опр}}$ – время опроса каналов, с.

Вся информация о задержках имеется в документации к тому или иному устройству.

3. Протокол обмена данными, который можно разделить следующим образом:

3.1. Протоколы последовательного опроса типа Master/Slave. Последовательный опрос ведомых устройств осуществляется одним ведущим устройством (например, протокол Modbus). В протоколах такого типа основным фактором задержки обмена информацией является количество подключенных ведомых устройств.

Для расчета задержек, возникающих в протоколе обмена, необходимо знать: $N_{\text{усо}}$ – количество подключенных ведомых устройств, шт; $T_{\text{зап}}$ – время запроса, с; $T_{\text{тиш}}$ – время паузы после цикла опроса, с; $T_{\text{усо.отв}}$ – время ответа подключенного устройства, с; $P_{\text{ош}}$ – вероятность возникновения коллизии.

3.2. Протоколы с фиксированным временем для передачи информации. В протоколах данного типа [8; 9] ведущее устройство открывает «окно» для приема данных. Время приема строго фиксировано. Данный протокол применяется в системах реального времени [10]. Для расчета задержек в протоколе данного типа необходимо знать: $T_{\text{зап}}$ – продолжительность приема информации, с; P – приоритет рассматриваемого сигнала; $T_{\text{тиш}}$ – время задержки между «окнами» приема информации, с.

Следует считать приоритет рассматриваемого критического параметра наивысшим, что обеспечивает первоочередную передачу.

3.3. Протоколы с равными участниками сети [11; 12]. Все устройства в сети с протоколом такого типа имеют право сами инициировать передачу данных.

Если в сети все устройства имеют равный приоритет, то это будет приводить к постоянным коллизиям и потере информации, что является недопустимым для большинства САР.

При разделении на приоритеты устройства с низким приоритетом могут никогда не передать информацию из-за большого потока информации с устройств с более высоким приоритетом.

4. Программируемый логический контроллер. Время обработки информации и выдачи сигнала для каждого контроллера описано в технической документации, но может варьироваться от закона регулирования для исследуемого параметра и нагрузки на ПЛК в данный момент времени. $T_{\text{плк}}$ – время обработки информации и выдачи сигнала, с.

5. Исполнительный механизм (ИМ). Под временем реакции исполнительного механизма понимается время, прошедшее с момента появления сигнала на его входе до момента начала движения регулирующего органа. Задержки могут быть созданы электронным блоком обработки сигнала ИМ. $T_{\text{им}}$ – время реакции исполнительного механизма, с.

При анализе каждого компонента, входящего в состав РКС, к имеющимся формулам могут быть добавлены параметры, влияющие на прохождение сигнала. Вся информация о задержках, имеющихся в конкретном узле, описана в технической документации к устройствам/протоколам связи.

Время реакции контура регулирования критического параметра является переменной величиной в прогнозируемых пределах от T_{min} до T_{max} , где T_{min} – минимальное время реакции системы, с; T_{max} – максимальное время реакции системы, за исключением случаев, когда все устройства и сети связи между ними имеют единый синхронизирующий сигнал, что на практике бывает крайне редко.

Пример расчета РКС. Для примера расчета РКС возьмем контур регулирования давления жидкости в трубопроводе.

Выделив РКС из общей структурной схемы, опишем каждый ее элемент.

1. Интеллектуальный датчик давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051» (рис. 1, поз. РТ). Исходя из технической документации, определяем параметры для расчета времени установления выходного сигнала:

$T_{\text{пс}}$ – время переходного процесса сенсора, с;

$t_{\text{д}}$ – время демпфирования, с;

τ – время цикла измерения датчика (время обновления данных канала), с.

$T_{\text{пс}}$ для данного датчика равен 100 мс, параметр $t_{\text{д}}$ установлен на значение 200 мс, время обновления данных канала равно 100 мс:

$$T_{\text{пп.уст}} = 100 + 200 + 100 = 400 \text{ мс.}$$

Отобразим на временной шкале цикл работы первичного преобразователя (рис. 2).

2. Устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-4019» (рис. 1, поз. УСО1) имеет 8 аналоговых входов. Согласно принципиальной схеме, первичный преобразователь подключен к первому каналу:

– метод опроса каналов – последовательный;

– число каналов равно 8 ($N_{\text{кн}} = 8$);

– скорость опроса канала равна 120 мс/канал ($T_{\text{нк}} = 120$):

$$T_{\text{усо}} = N_{\text{кн}} \cdot T_{\text{кн}} = 8 \cdot 120 = 960 \text{ мс.}$$

Графически изобразим полученную информацию (рис. 3).

3. Протокол связи ModBUS RTU. Исходя из документации протокола ModBUS RTU, а также параметров исследуемой сети, определяем необходимые для расчета величины:

– количество подключенных ведомых устройств в одну сеть (так как опрос происходит последовательно) $N_{\text{усо}} = 3$ шт;

– время запроса определено параметрами протокола $T_{\text{зап}} = 100$ мс;

– время ответа подключенного устройства определяется настройками сети (в протоколах Modbus среднее время ответа ведомых устройств равно 0,25 с): $T_{\text{отв}} = 200$ мс;

– время паузы после цикла опроса определяется настройками сети: $T_{\text{тиш}} = 100$ мс.

Изобразим на временной шкале цикл опроса ведомых устройств рассматриваемой РКС (рис. 4).

4. Программируемый логический контроллер «ОВЕН ПЛК100-220» (рис. 1, поз. ПЛК). Время обработки и формирования выходного сигнала зависит от программы, которая занесена или будет занесена в ПЛК. Инструкция на прибор регламентирует время выполнения цикла программы в пределах 0,05–1 с. Если мы производим анализ существующей РКС, то этот параметр известен и является конкретной величиной. В случае анализа проектируемой АСУ ТП для расчета принимается как минимальное, так и максимальное значение:

$$T_{\text{cpu}_{\text{min}}} = 50 \text{ мс;}$$

$$T_{\text{cpu}_{\text{max}}} = 1000 \text{ мс.}$$

5. Устройство связи с объектом «ЭЛЕМЕР-EL-40242» имеет 4 аналоговых выхода (рис. 1, поз. УСО3). Согласно принципиальной схеме исполнительный механизм подключен ко второму каналу.

Согласно инструкции на прибор, при установленной скорости обмена данными 9600 бод, скорость чтения регистров $T_{\text{чт}} = 100$ мс.

Также, согласно спецификации, требуется пауза не менее 40 мс перед обработкой следующей команды: $T_{\text{паузы}} = 40$ мс.

Изобразим на временной шкале цикл формирования выходных сигналов (рис. 5).



Рис. 2. Цикл работы интеллектуального датчика давления «МЕТРАН-100-ДИ-1051»

Fig. 2. Operating cycle of intelligent sensor of pressure “METRAN-100-DI-1051”

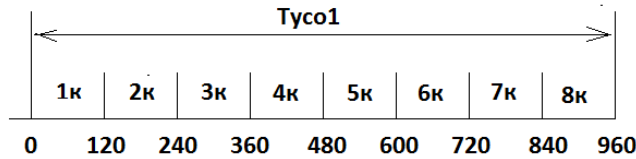


Рис. 3. Цикл работы УСО «ЭЛЕМЕР-EL-4019»

Fig. 3. Operating cycle of YCO “ELEMER-EL-4019”

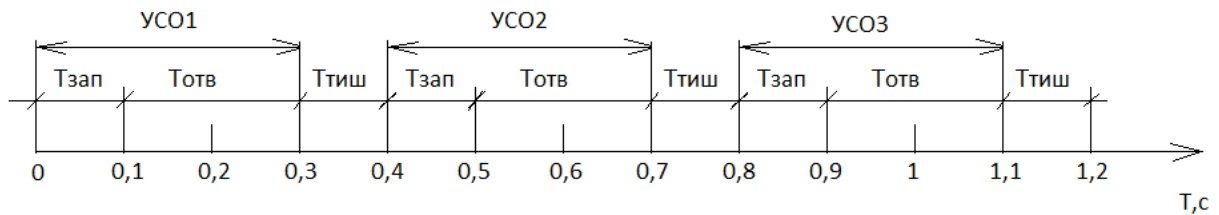


Рис. 4. Цикл опроса ведомых устройств

Fig. 4. Poll cycle of in-house devices

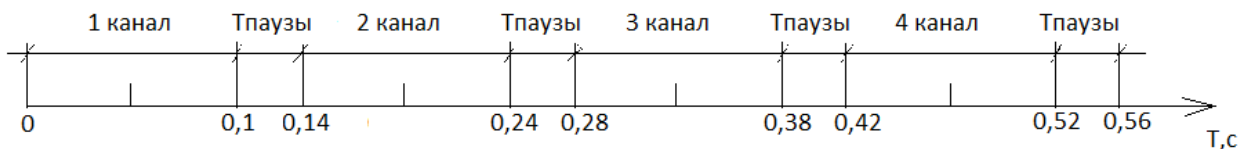


Рис. 5. Цикл формирования выходных сигналов на УСО «ЭЛЕМЕР-EL-4024»

Fig. 5. Formation cycle of loop output signal on YCO “ELEMER-EL-4024”

6. Исполнительный механизм МЭО-6,3/20-0,63-01 (рис. 1, поз. ИМ). В инструкции к прибору не сказано о возникающих задержках и циклах его работы. Однако так как ИМ принимает унифицированный сигнал, в его составе есть электронный блок, включающий в себя АЦП, нормирующий узел обработки, ЦАП, что накладывает определенные задержки на сигнал. Примем $T_{им,мин} = 1$ мс и $T_{им,макс} = 10$ мс.

Однако для расчета, например предельного значения критического параметра, необходимо учесть время полного хода выходного вала, равное 20 с.

Расчет максимального времени прохождения сигнала по регулятивной карте. Составим графики циклов максимальной продолжительности работы [13]

всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС (рис. 6), сдвигая их относительно друг друга так, чтобы задержка сигнала в каждом узле была максимальной [14]. Порядок расположения графиков выстраивается согласно логике прохождения сигнала:

- изменение величины критического параметра;
- цикл работы первичного преобразователя;
- цикл работы УСО1;
- цикл передачи данных по ModBUS RTU;
- цикл обработки и формирования сигнала в ПЛК;
- цикл передачи данных по ModBUS RTU;
- цикл обработки и передачи управляющего сигнала на УСО3;
- цикл работы ИМ;
- изменение величины критического параметра.

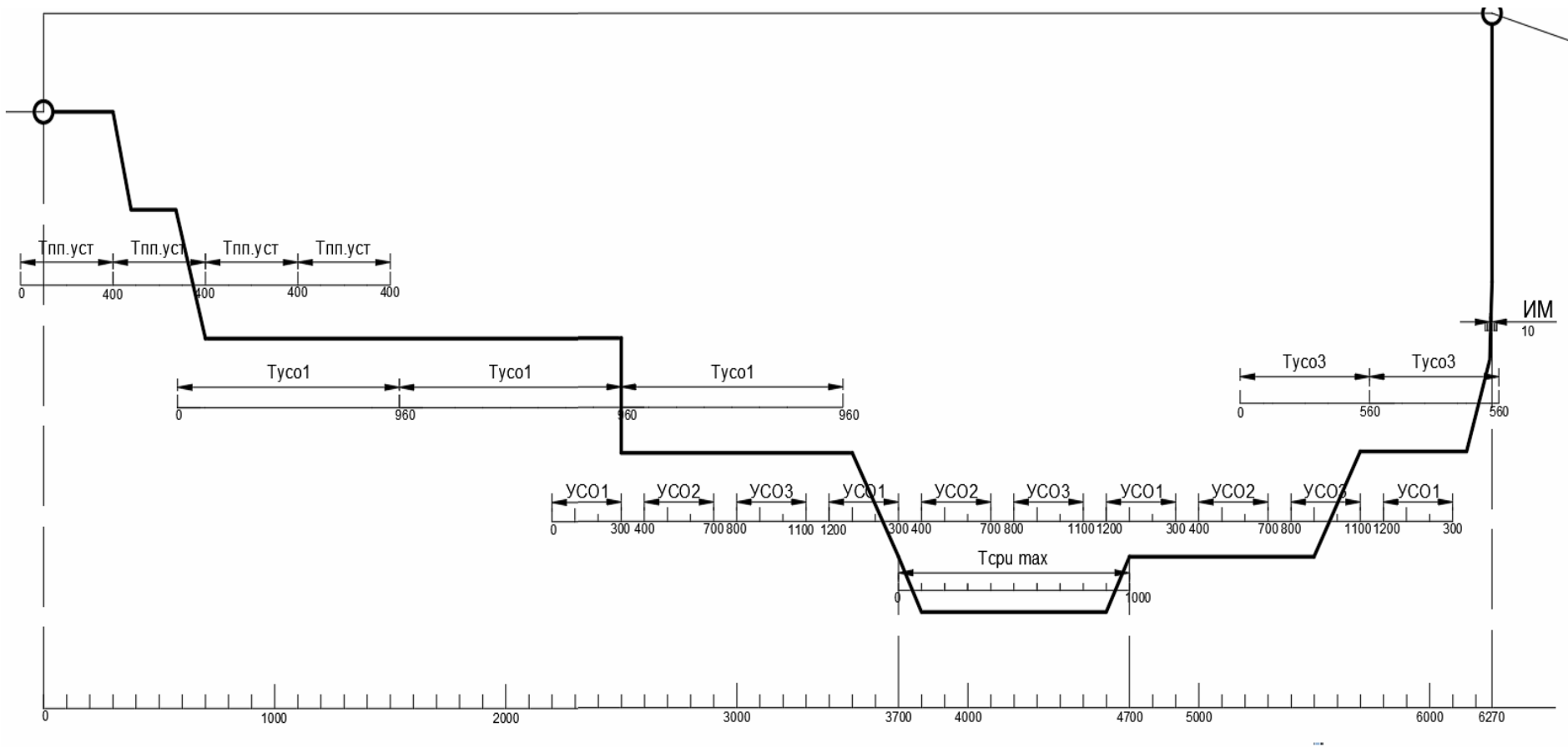


Рис. 6. График циклов максимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС

Fig. 6. Diagram of cycles of maximum time of operation of all devices and reports of the considered PKC

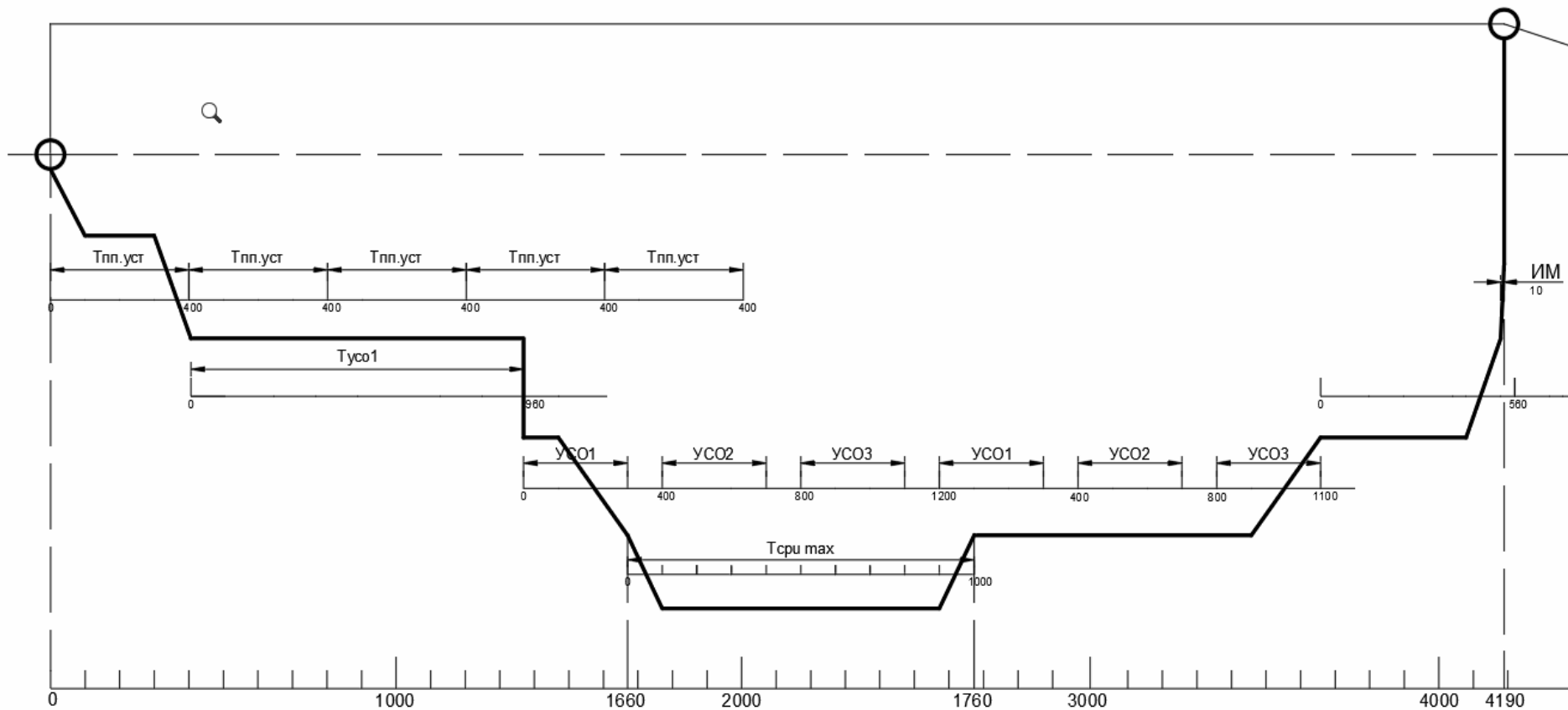


Рис. 7. График циклов минимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС

Fig. 7. Diagram of cycles of minimum time of operation of all devices and reports of the considered PKC

Исходя из данных, полученных графически, выписываем задержки, возникающие в результате прохождения сигнала по РКС: $T_{\max} = 3700 + 1000 + 1570 = 6270$ мс.

Расчет минимального времени прохождения сигнала по регулятивной карте. Составим графики циклов минимальной продолжительности работы всех устройств и протоколов рассматриваемой РКС (рис. 7), сдвигая их относительно друг друга так, чтобы задержка сигнала в каждом узле была минимальной. Порядок расположения графиков аналогичен вышеуказанному: $T_{\min} = 1660 + 1000 + 1530 = 4190$ мс.

Анализ полученных результатов. Анализируя данную РКС, был вычислен диапазон времени реакции системы на изменение критического параметра: 4190–6270 мс.

Для того, чтобы понять, удовлетворяет ли данный контур регулирования предъявляемым требованиям, необходимо сравнить максимальную скорость изменения регулируемого параметра и сопоставить ее со временем реакции системы [15].

Принимаем время реакции системы как сумму максимального значения времени и запаса надежности, равного 20 % [16]:

$$T_{\text{ркс, макс}} = 7524 \text{ мс.}$$

Например, вследствие некорректной работы компрессора начался бесконтрольный набор давления в трубопроводе (0,7 атм/с). Величина задания 5 атм ($P_{\text{нач}} = 5$). Максимально допустимое давление в системе 12 атм ($P_{\text{max}} = 12$). Исходя из данных, получим:

$$T_{\text{кр}} = (12 - 5)/0,7 = 10 \text{ с.}$$

Следовательно, время реакции системы на изменение данного параметра не должно превышать 10 с, в противном случае произойдет разрушение технологического оборудования.

Из неравенства $7,524 < 10$ сделаем вывод, что анализируемый контур регулирования критического параметра *удовлетворяет предъявляемым требованиям*.

Рассмотрим случай, когда анализируемая РКС не удовлетворяет условиям безопасности объекта.

Предположим, что бесконтрольный набор давления происходит со скоростью 1 атм/с:

$$T_{\text{кр}} = (12 - 5)/1 = 7 \text{ с;}$$

$$7,524 > 7 \text{ с.}$$

Анализируемый контур регулирования критического параметра *не удовлетворяет условиям безопасности*. Для предотвращения возможности наступления негативных последствий в случае возникновения аварийной ситуации, необходимо произвести модернизацию замкнутого контура регулирования с целью уменьшения времени реакции.

Заключение. В настоящей работе была приведена методика расчета временных задержек на основании исследования регулятивной карты сигнала. Исходя из полученных результатов, сделан вывод о необходимости разработки методики реструктурирования контура автоматического регулирования с целью достижения требуемого времени реакции системы.

Библиографические ссылки

1. Федоров Ю. К. Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУТП. М. : Инфра-Инженерия, 2011. 576 с
2. Шидловский С. В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем // Известия ТПУ. 2006. № 8. С. 19–22.
3. Мандель А. С. Экспертно-статистические методы обработки информации в интегрированных системах управления производством и технологическими процессами // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 55–59.
4. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб. : Невский Диалект, 2001. 557 с.
5. Ходашинский И. А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы // Проблемы управления. 2009. № 4. С. 15–23.
6. Кувайскова Ю. Е. Методика структурно-параметрической идентификации системы временных рядов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-4. С. 914–918.
7. Калинин А. О. Общая методология расчета времени реакции системы автоматического управления критических параметров технологических процессов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : материалы Всерос. науч.-практ. конф. / СибГТУ. Красноярск, 2016. Т. 1. С. 219–221.
8. Performance aspects of PROFINET IO / H. Kleines [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. 2008. Т. 55, № 1. С. 290–294.
9. Poschraann A., Neumann P. Architecture and model of Profinet IO // AFRICON. 7th AFRICON Conference in Africa. IEEE. 2004. Т. 2. С. 1213–1218.
10. Климентьев К. Е. Системы реального времени. Самара : Изд-во СГАУ. 2008.
11. Третьяков С. А. Controller Area Network (CAN) локальная сеть контроллеров // Электроника. 1998. № 9. С. 14–16.
12. Лопухов И. Сети: от теории к практической реализации. RealTime Ethernet, 2010.
13. Алгоритмизация детерминированных моделей технологических циклов автоматизированных систем управления / И. В. Ковалев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 3. С. 569–574.
14. Сердюков О. В. Методика измерения параметров быстродействия современных ПТК для АСУТП тепловых электростанций // Горение твердого топлива : VIII Всерос. конф. с междунар. участием (13–16 ноября 2012 г.) / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. С. 941–948.
15. Kaczor G., Mlynarski S., Szkoda M. Verification of safety integrity level with the application of Monte Carlo simulation and reliability block diagrams // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Т. 41. С. 31–39.
16. К вопросу о состояниях работоспособности структурно-сложных систем автоматического управления / Кузнецов П. А. [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 941–945.

References

1. Fedorov Yu. K. *Poryadok sozdaniya modernizatsii i soprovozhdeniya asutp* [The order of creation, modernization and maintenance of process control systems]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2011, 576 p.
2. Shidlovsky S. V. [Mathematical modeling of complex objects with distributed parameters in problems of automatic control of structurally tunable systems]. *Izvestiya TPU*. 2006, No. 8. P. 19–22. (In Russ.)
3. Mandel A. S. [Expert statistical methods of information processing in integrated control systems of production and technological processes]. *Control problems*. 2006, No. 6. P. 55–59. (In Russ.)
4. Olsson G., Piani D. *Cifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital systems of automation and control]. St. Petersburg, Nevskiy Dialekt Publ., 2001, 557 p.
5. Khodashinsky I. A. [Identification of fuzzy systems: methods and algorithms]. *Control problems*. 2009, No. 4. P. 15–23 (In Russ.)
6. Kuvayskova Yu. E. [Method of structural parametric identification of a system of time series] *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013, Vol. 15, No. 4-4. P. 914–918. (In Russ.)
7. Kalinin A. O. [General methodology for calculating the response time of the automatic control system for critical parameters of technological processes]. *Young scientists in solving urgent problems of science: Mater. All Russia. Scientific practical. Conf.* Krasnoyarsk, SibSTU. 2016, Vol. 2. P. 219–221 (In Russ.)
8. Kleines H. et al. Performance aspects of PROFINET IO IEEE. *Transactions on nuclear science*. 2008, Vol. 55, No. 1, P. 290–294.
9. Poschraann A., Neumann P. Architecture and model of Profinet IO AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa. IEEE, 2004, Vol. 2, P. 1213–1218.
10. Klimentyev K. E. [Real time systems]. *Samara: SGAU Publishing House*. 2008 (In Russ.)
11. Tretyakov S. A. Controller Area Network CAN lokalnaya set kontrollerov [Controller Area Network (CAN) local network of controllers] *Electronics*. 1998, No. 9, P. 14–16 (In Russ.)
12. Lopukhov I. *Seti ot teorii k prakticheskoy realizatsii* [Networks: from theory to practical implementation]. Real Time Ethernet, 2010.
13. Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Losev V. V., Khrapunova V. V., Efremova S. V. [Algorithmization of deterministic models of technological cycles of automated control systems]. *Bulletin of Siberian State University of Management*. 2016, Vol. 17, No. 3, P. 569–574 (In Russ.)
14. Serdyukov O. V. [Method of measuring the performance parameters of modern PTC for ASUTP thermal power plants]. VIII All Russian Conference with international participation “Combustion of solid fuel” Institute of Thermo physics. S. S. Kutateladze SB RAS. 2012, No. 13–16. P. 941–948 (In Russ.)
15. Kaczor G., Mlynarski S., Szkoda M. Verification of safety integrity level with the application of Monte Carlo simulation and reliability block diagrams. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016, Vol. 41, P. 31–39.
16. Kuznetsov P. A., Kovalev D. I., Losev V. V., Kalinin A. O. To the question of the states of efficiency of structurally-complex systems of automatic control. *Bulletin of Siberian State University of Management*. 2015. Vol. 16, No 4, P. 941–945 (In Russ.)