

## ПАРИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В СЕТЕВОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Д.С. Подхватилин, В.И. Клепиков (ООО “Синхро-Линк”)

Рассмотрена проблема организации управления резервированными исполнительными устройствами в распределенной сетевой системе управления. Предложен подход, основанный на одновременном параллельном управлении всеми каналами резервированного исполнительного устройства, причем формирование управляющего сигнала по каждому каналу выполняется полностью независимым контуром управления, сформированном из узлов сетевой системы. Для компенсации временных задержек, связанных с наличием в системе последовательных каналов информационного обмена, предложена структура, основанная на параллельной работе ПИД-регуляторов с предикторами Смита. Для обнаружения и парирования отказа в канале преобразования резервированного исполнительного устройства предложен подход, основанный на наложении на управляющие сигналы различных каналов синусоидальных противофазных сигналов. Такой подход позволяет сохранить полную автономность формирования управляющих сигналов.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, резервирование, исполнительные устройства, управляющий сигнал, предиктор Смита.

В сетевой распределенной системе управления датчики первичной информации, исполнительные устройства и контроллеры связаны общей коммуникационной шиной в единую управляющую сеть [1]. Контроллеры с сетевыми интерфейсами и устройствами ввода/вывода являются сетевыми узлами, пространственно разнесенными по объекту управления с тем, чтобы максимально приблизить контроллер к месту получения исходных данных и/или выдачи управляющих воздействий. Первичная информация обрабатывается непосредственно в месте ее получения и по общей шине данных доставляется всем узлам, где она необходима для выработки управляющих воздействий. Рассчитанные управляющие воздействия по шине данных передаются на узлы сети, выдающие управляющие сигналы на подключенные к ним исполнительные устройства.

Коммуникационный канал сетевой распределенной структуры должен обеспечивать согласованность данных, с которыми параллельно работают все узлы сети как по времени (синхронизацию), так и по значениям (целостность данных). То есть необходимо, чтобы во все узлы управления поступали бы идентичные данные от датчиков объекта, а на исполнительные устройства поступали бы управляющие сигналы, синхронизированные по времени. Особый интерес представляют собой резервированные исполнительные устройства, на разные каналы преобразования которых из различных узлов управления должны поступать идентичные или достаточно близкие по величине управляющие сигналы. Такая схема (рис. 1) управления относится к дублированным или параллельным структурам [5] и обеспечивает наиболее высокие показатели надежности, так как содержит обших последовательно подключенных устройств. Применительно к сетевой распределенной системе управления регуляторы  $R_1$  и  $R_2$  реализованы на различных сетевых узлах и независимо друг от друга выдают управляющие воздействия  $u_1$  и  $u_2$  на также

независимые друг от друга каналы преобразования исполнительного устройства  $W_1$  и  $W_2$ . Далее сигналы от двух каналов преобразования суммируются на общем рабочем органе исполнительного устройства.

Далее, в статье рассмотрен подход к реализации дублированной архитектуры управления дублированным исполнительным устройством в распределенной сетевой структуре управления.

Исполнительные устройства являются неотъемлемыми компонентами электронных систем управления, выполняющими функции преобразования слабых электрических сигналов управления в требуемые физические воздействия на объект, с одновременным усилением мощности управляющего воздействия, как, например, в электрогидравлическом преобразователе (рис. 2), где рабочая жидкость

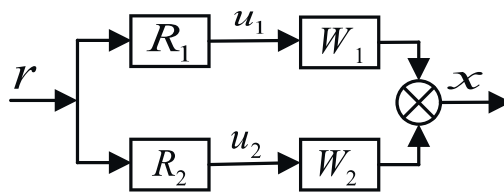


Рис. 1. Схема системы управления с параллельной структурой

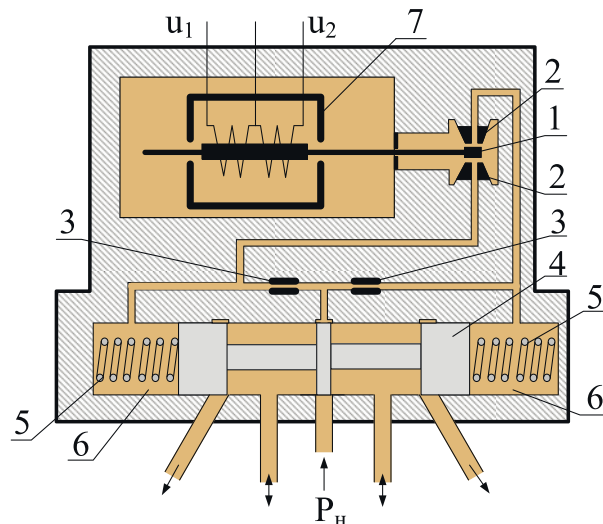


Рис. 2. Схема электрогидравлического преобразователя, где 1 – управляющая заслонка; 2 – сопла; 3 – постоянные гидравлические дроссели; 4 – золотник гидравлического исполнительного механизма; 5 – центрирующие пружины; 6 – рабочие камеры; 7 – электромеханический преобразователь;  $P_n$  – давление питания

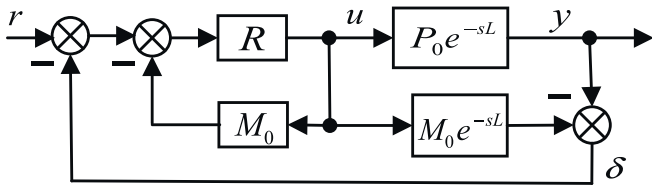


Рис. 3. Следящая система с предиктором Смита

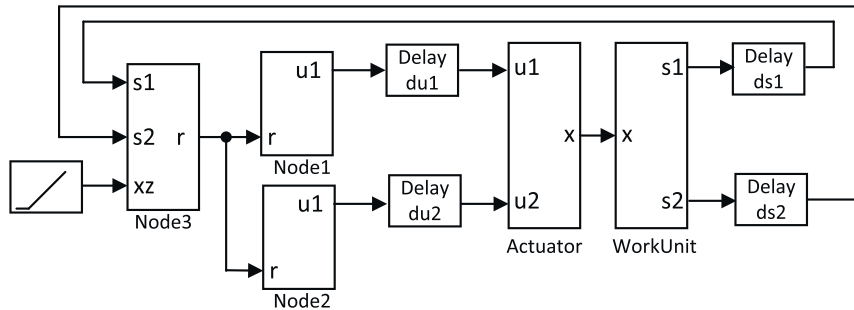


Рис. 4. Схема моделирования параллельного управления дублированным исполнительным механизмом

из напорной магистрали поступает через постоянные дроссели к переменным дросселям и рабочим камерам [2]. Входной электрический сигнал управляет положением заслонки. При ее смещении изменяются соотношения проходных сечений рабочих окон гидравлического усилителя, вследствие чего изменяются значения давления в рабочих камерах, что вызывает перемещение золотника. Усиление по мощности может быть достигнуто более чем в 100 раз. Такие электрогидравлические преобразователи применяют, например, для управления рабочими поверхностями самолетов и другими исполнительными органами.

Задачей системы управления является подача управляющих воздействий  $u_1$  и  $u_2$ , обеспечивающих перемещение штока в заданное положение и стабилизацию его в этом положении при воздействии внешних возмущающих усилий. Контроль положения штока выполняется датчиком обратной связи (на рисунке не показан). Резервирование электрогидравлического преобразователя по электрической части выполняется благодаря использованию соответствующего числа обмоток управления отклонением управляющей заслонки (1). Функции преобразования ( $W_1$  и  $W_2$ ) электрических сигналов  $u_1$  и  $u_2$  в механическое перемещение заслонки, и соответственно в усилие на золотнике

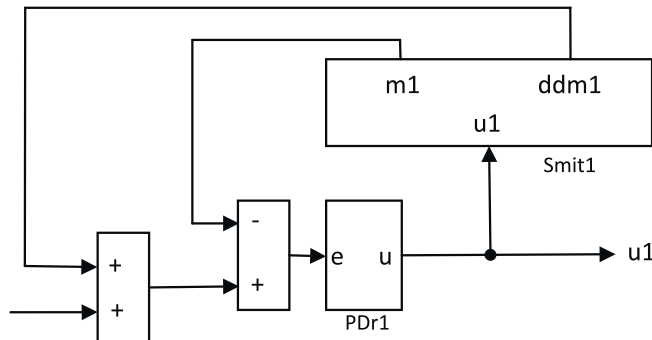


Рис. 5. Схема блоков Node1 и Node2

(4) реализуются обмотками и магнитной системой электромеханического преобразователя (7), отклоняющей заслонку (1). Заслонка (1) выполняет также функцию сумматора сигналов управления, так как ее положение зависит от суммарного тока, протекающего по обмоткам электромеханического преобразователя (7). Золотник (4) является общим рабочим органом исполнительного устройства, в данном примере являющимся интегрирующим звеном с передаточной функцией  $P_0 = \frac{1}{s}$ .

В сетевой распределенной системе управления модуль управления (контроллер), выполняет расчет управляющих воздействий по информации, полученной от датчиков по последовательному информационному каналу, и рассчитанные им управляющие воздействия также по последовательному каналу отправляются на исполнительные устройства. То есть в сетевой системе управления в замкнутые динамические контуры управления и регулирования оказывается включенным процесс передачи информации по последовательному цифровому информационному каналу. Специфика цифрового информационного канала заключается в том, что передача данных между различными элементами (узлами) системы ведется не непрерывно, а пакетами с определенной частотой следования, что неизбежно приводит к появлению транспортного запаздывания в замкнутом контуре регулирования и влияет на устойчивость и качество регулирования.

Известно [3], что, если для объекта регулирования выполняется условие  $L/(L+T) > 0,2...0,5$ , где  $L$  — величина транспортной задержки,  $T$  — доминирующая постоянная времени объекта, то для компенсации влияния транспортной задержки на процесс регулирования применяются предикторы Смита [4]. Структура следящей системы с предиктором Смита представлена на рис. 3.

Работа системы может быть описана выражениями:

$$y = P_0 e^{-sL} R(r - \delta - M_0 u), \delta = y - M_0 e^{-sL} u, y = P_0 e^{-sL} u,$$

где:  $y$  — выходной сигнал системы (показания датчика обратной связи),  $P_0$  — передаточная функция исполнительного механизма,  $R$  — передаточная функция регулятора,  $u$  — выходной сигнал регулятора,  $M_0$  — передаточная функция модели,  $\delta$  — невязка между показаниями датчика обратной связи и выходным сигналом модели,  $r$  — заданное входное воздействие.

Отсюда находим  $y = \left[ \frac{RP_0}{1 + RM_0 + R(P_0 - M_0)e^{-sL}} r \right] e^{-sL}$ . Из последнего выражения видно, что чем более точная модель объекта используется в предикторе, то есть чем меньше величина  $(P_0 - M_0)$ , тем величина транспортной задержки оказывает меньшее влияние на передаточную функцию замкнутой системы. При  $P_0 = M_0$ , транспортное запаздывание не входит в выражение

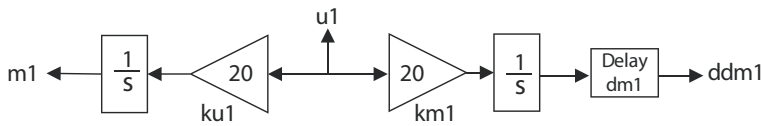


Рис. 6. Схема блока Smit1

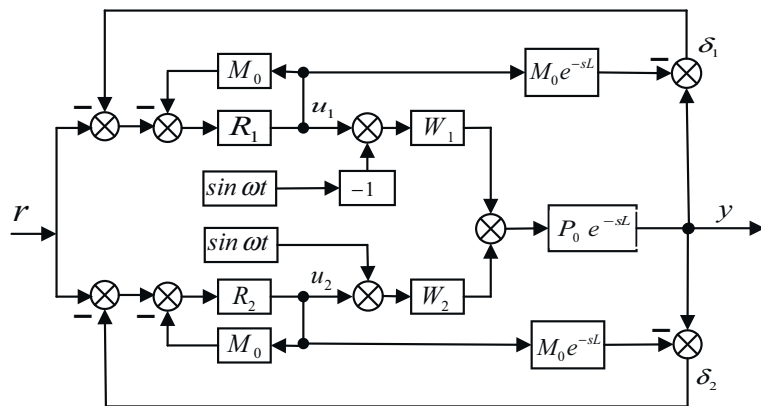


Рис. 7. Структурная схема дублированной системы управления электрогидравлическим преобразователем с предиктором Смита

передаточной функции замкнутой системы регулирования  $\left[ \frac{RP_0}{1+RM_0} \right]$ , то есть оно не входит в контур обратной связи и не влияет на устойчивость и быстродействие системы.

Схема моделирования (рис. 4) параллельного управления содержит собственно рабочий орган *WorkUnit*, электрогидравлический преобразователь *Actuator*, два сетевых узла *Node1*, *Node2*, формирующих управляющие сигналы  $u_1$  и  $u_2$  по закону ПИД-регулятора с коррекцией на основе предиктора Смита и сетевой узел и *Node3*, который формирует единое для узлов управления текущее значение положения исполнительного органа как среднее арифметическое из показаний двух датчиков (вопрос обнаружения и парирования отказов датчиков в данной статье не рассматривается).

Блоки *du1* и *du2* моделируют транспортные задержки прохождения сигналов от узлов управления *Node1* и *Node2* на обмотки электрогидравлического преобразователя, блоки *ds1* и *ds2* моделируют транс-

портные задержки прохождения сигналов датчиков до узла *Node3*. Блок *xz1* формирует тестовое линейно нарастающее заданное значение. Схема моделирования узлов *Node1* и *Node2* (рис. 5) содержит блок регулятора Смита (рис. 6), в котором для рассматриваемого примера  $M_0 = WP_0$ ,  $P_0 = \frac{1}{s}$ , где  $W = W_1 = W_2 = ku1 = km1 = 20$  — по-прежнему (рис. 1) передаточные функции преобразования электрических сигналов  $u_1$  и  $u_2$  в механическое перемещение заслонки.

Для структурной схемы (рис. 7) рассматриваемой системы справедлива система уравнений (1)... (5). Назначение блоков формирования синусоидальных сигналов будет ясно из дальнейшего изложения.

$$y = P_0 e^{-sL} (W_1 u_1 + W_2 u_2), \quad (1)$$

$$u_1 = R_1 (r - \delta_1 - M_0 u_1), \quad (2)$$

$$u_2 = R_2 (r - \delta_2 - M_0 u_2), \quad (3)$$

$$\delta_1 = y - M_0 e^{-sL} u_1, \quad (4)$$

$$\delta_2 = y - M_0 e^{-sL} u_2, \quad (5)$$

Принимая во внимание, что при отсутствии отказов  $W_1 = W_2 = W$ ,  $u_1 = u_2 = u$  и  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ , выражение (1) запишется в виде:

$$y = 2WP_0 e^{-sL} u, \quad (7)$$

откуда

$$u = \frac{y}{2WP_0 e^{-sL}}. \quad (8)$$

Выполнив подстановку выражений (2)...(5) в (1) с учетом (8), получим:

$$y = \left[ \frac{2WRP_0}{1+RM_0 + R(2WP_0 - M_0)e^{-sL}} r \right] e^{-sL}, \quad (9)$$

В общем случае для  $n$ -канального управления выражение (9) запишется в виде:

$$y = \left[ \frac{nWRP_0}{1+RM_0 + R(nWP_0 - M_0)e^{-sL}} r \right] e^{-sL}. \quad (10)$$

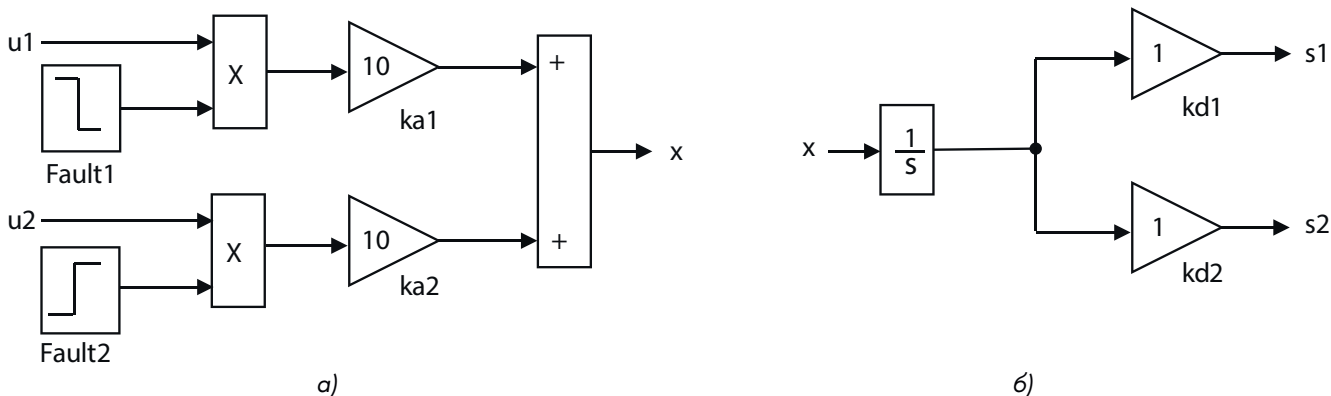


Рис. 8. Схемы моделирования: а) блока *Actuator* (электромеханический преобразователь и заслонка) и б) блока *WorkUnit* (золотник гидравлического исполнительного механизма)

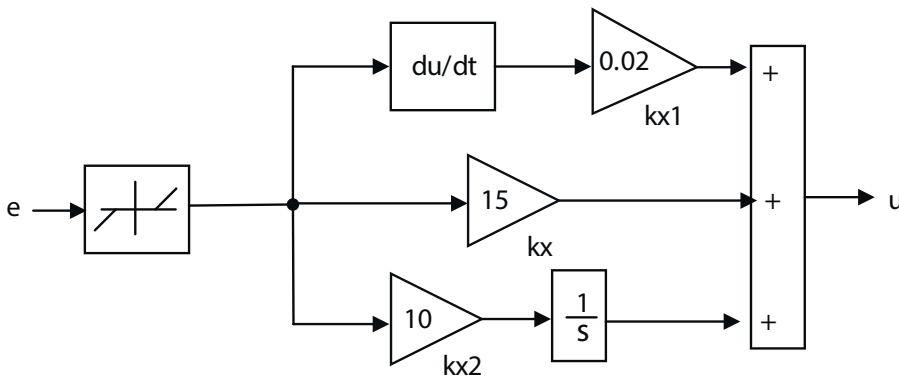


Рис. 9. Схема ПИД-регулятора

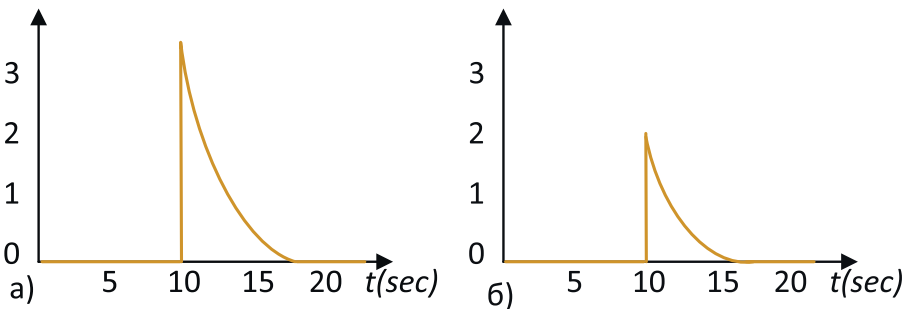


Рис. 10. Реакция на отказ электрогидравлического преобразователя в а) одноканальной и б) дублированной системах

Если принять  $M_0 = nWP_0$ , то разность  $nWP_0 - M_0$  в знаменателе стремится к нулю и из передаточной функции системы исключается транспортная задержка, которая только добавляется к результирующей передаточной функции.

При моделировании системы электромеханический преобразователь задавался двумя пропорциональными звеньями, соответствующими обмоткам преобразователя, которые работают на заслонку — сумматор (рис. 8а, блок *Actuator*). Модель золотника задавалась интегрирующим звеном, работающим на два выхода, соответствующих дублированному датчику положения (рис. 8б, блок *WorkUnit*). Частичный отказ одного из каналов преобразования электрогидравлического преобразователя (например, при появлении межвитковых замыканий в обмотке или при снижении коэффициента передачи выходного каскада) моделировался ступенчатым изменением коэффициента преобразования канала (блоки *Fault1* и *Fault2*).

В качестве регулятора (блок *PDr1* на рис. 5) использовался ПИД-регулятор,

структура и параметры которого показаны на рис. 9.

Реакция на ступенчатое снижение на 30% коэффициента усиления в одном из каналов преобразователя показана на рис. 10. По поведению выходного сигнала  $x$  блока *Actuator* (рис. 8) видно, что дублированная система (рис. 10, б) обладает существенно меньшей чувствительностью к возмущению, вызванному появлением отказа, чем одноканальная (рис. 10 а).

Рассмотрим далее возможность обнаружения и парирования отказа в одном из каналов управления электрогидравлического преобразователя. Для этого можно воспользоваться, например, алгоритмами амплитудного или временного распределения общего управляющего сигнала на разные каналы преобразователя [6]. При этом должен существовать один общий узел, формирующий общий управляющий сигнал, что нарушает принцип распределенного

управления и снижает общую надежность системы. Рассмотрим подход, позволяющий сохранить полную автономность узлов, формирующих управляющие сигналы. Для этого в схеме (рис. 7) дополним каждый канал управления формирователями синусоидальных противофазных сигналов, складывающихся со сформированным каналом сигналом управления.

При отсутствии отказов и синхронной работе каналов управления противофазные синусоидальные сигналы будут взаимно компенсироваться на входе

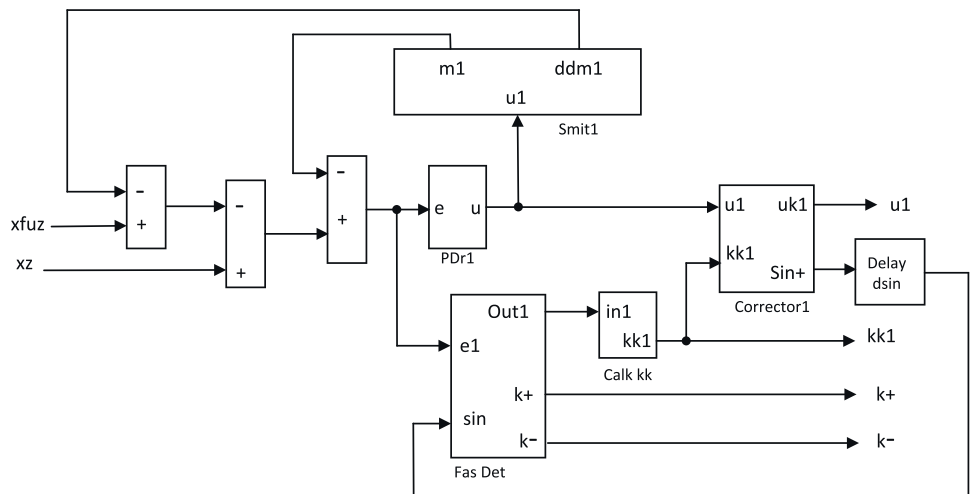


Рис. 11. Схема блоков *Node1* и *Node2*, дополненная блоками обнаружения и парирования отказов исполнительного устройства



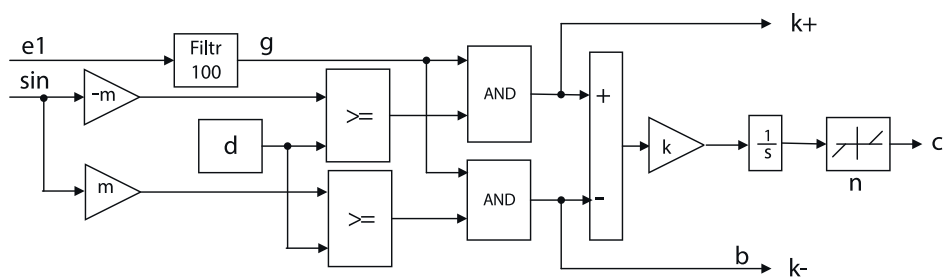


Рис. 12. Схема фазового детектора

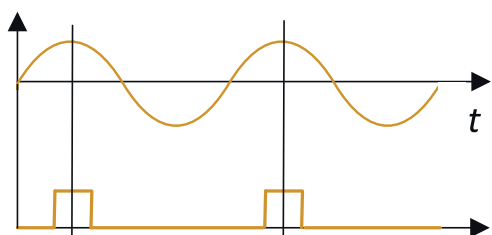


Рис. 13. Эффект «сужения» длительности положительных полупериодов исходной частоты

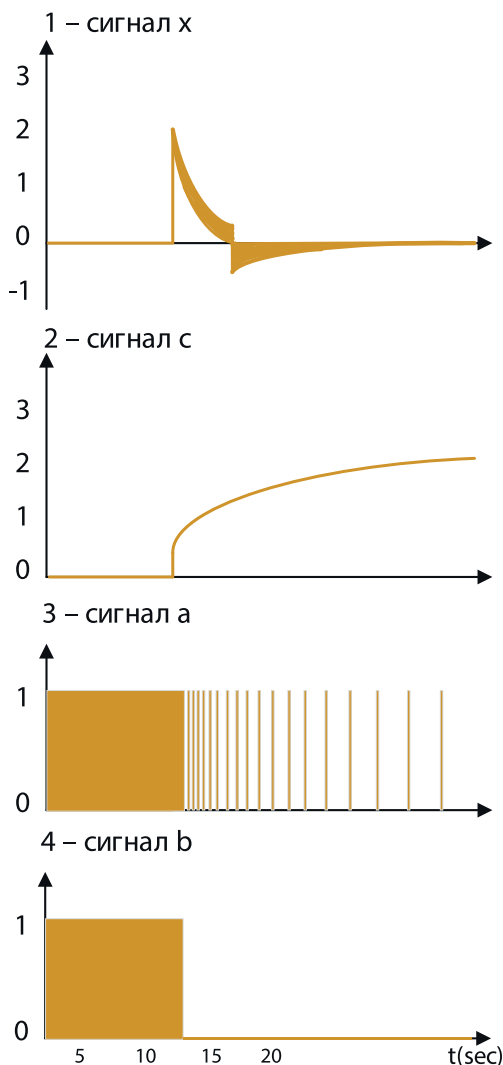


Рис. 14. Результат работы системы при возникновении ступенчатого отказа в первом канале исполнительного механизма на 10-й секунде

исполнительного механизма, и работа системы не будет отличаться от исходного варианта. Однако при появлении отказа в одной из обмоток исполнительного механизма или в выходном каскаде узла, синусоидальный сигнал одного из узлов будет превышать сигнал другого узла, и в сигнале ошибки регулирования

появится синусоидальная составляющая с фазой большего по величине сигнала, что может быть выявлено программными средствами. Как правило, появление отказа в канале исполнительного механизма (межвитковое замыкание в обмотке или снижение коэффициента усиления выходного каскада) вызывает снижение коэффициента передачи данного канала, соответственно синусоидальный сигнал с фазой исправного канала будет преобладать в выходном сигнале системы. Обнаружение синусоидального сигнала известной частоты в сигнале ошибки регулирования свидетельствует о появлении отказа в исполнительном механизме, а фаза детектированного сигнала несет информацию о том, который из узлов отказал.

Для обнаружения и парирования отказа исполнительного устройства дополним схему узлов управления блоками фазового детектирования (*Fas Det*), вычисления корректирующего коэффициента (*Calc kk*) и корректора коэффициента передачи выходного каскада (*Corrector1*). Полученная схема изображена на рис. 11.

Схема фазового детектора (рис. 12) обеспечивает выделение из сигнала ошибки регулирования синусоидальной составляющей известной частоты.

Фазовый детектор формирует логические сигналы, принимающие значения «1» при совпадении во времени появления положительных полупериодов в сигнале ошибки регулирования и в исходном или инвертированном синусоидальном сигналах. Ввиду того, что исходный синусоидальный сигнал и сигнал ошибки регулирования проходят по разным коммуникационным каналам распределенной системы, они неизбежно приходят на вход фазового детектора с различными временными задержками. С целью компенсации влияния этих задержек в фазовом детекторе выполняется процедура «сужения» длительности положительных полупериодов исходной частоты (рис. 13).

Работа фазового детектора описывается выражениями (11) и (12):

$$a = \begin{cases} 1, & (g > 0) \& (m * \sin \omega t \geq d) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (11)$$

$$b = \begin{cases} 1, & (g > 0) \& (-m * \sin \omega t \geq d) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (12)$$

$$c = \begin{cases} \int k(a - b), & \text{abs}(a - b) \geq n \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (13)$$

Блок *Calc kk* выделяет положительную составляющую в значении выхода ( $c$ ) фазового детектора и подает ее в блок коррекции коэффициента передачи выходного каскада *Corrector1*, где это значение используется в качестве множителя ( $kk1$ ) для выходного сигнала регулятора ( $u1$ ).

Результат работы системы при возникновении ступенчатого отказа (снижение на 30% коэффициента усиления) в первом канале исполнительного механизма на 10 секунде показан на рис. 14.

На графике 1 показано поведение выходного сигнала  $x$  блока *Actuator* (рис. 8) на графиках 2, 3 и 4 — поведение сигналов ( $c$ ), ( $a$ ) и ( $b$ ) фазового детектора (рис. 12). Из графиков видно, что после обнаружения в сигнале ошибки регулирования синусоидальной составляющей коэффициент передачи отказавшего канала автоматически корректируется таким образом, чтобы значения управляющих сигналов по обоим каналам управления исполнительным механизмом стали равными. При этом длительность переходного процесса, вызванного появлением отказа, сокращается практически в два раза.

#### Выводы

1. Для компенсации транспортного запаздывания, вызванного включением цифрового последовательного канала информационного обмена в замкнутые кон-

туры управления и регулирования, эффективным является применение регулятора с предиктором Смита.

2. Использование параллельного управления резервированными каналами исполнительных устройств от полностью взаимно независимых узлов сетевой распределенной системы управления обеспечивает снижение чувствительности системы к отказам исполнительных механизмов.

3. Предложенный метод обнаружения и парирования отказов исполнительных устройств, основанный на анализе прохождения тестовых синусоидальных сигналов через замкнутую систему с предиктором Смита, является эффективным при использовании в сетевой распределенной структуре управления.

#### Список литературы

1. Таненбаум Э., Стеен М.В. Распределенные системы, принципы и парадигмы. СПб.: Питер. 2003. 877с.: ил.
2. Горкин А. П. Энциклопедия «Техника». Изд. Росмэн-Издат, 2006.
3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. 2007. № 1. стр. 78-88.
4. Smith O.J.M. Close control of loops with dead time // Chemical Engineering Progress. 1957. Vol. 53. P. 217-235.
5. Уланский В.В., Мачалин И.А. Оценка показателей эффективности эксплуатации систем авионики с комбинированными структурами резервирования. // Математичні машини і системи. 2007. № 2. стр. 90-97.
6. Клепиков В.И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М. «Золотое сечение». 2014. 392 с.

*Клепиков Владимир Иванович — канд. техн. наук, генеральный директор, Подхватилин Дмитрий Станиславович — главный специалист ООО «Синхро-Линк». Контактный телефон (495) 640-09-47. E-mail: viklepikov@mail.ru*

#### Воткинск включился в соревнование энергоэффективных городов

В ходе реализации первого в ЖКХ Удмуртии крупного энергоэффективного инвестиционного проекта на городских центральных тепловых пунктах (ЦТП) Воткинска установлена тепловая автоматика.

Более 25 млн. руб. ежегодной экономии принесет ЗАО "Теплосбытовая компания "Воткинский завод" установка на 22 городских ЦТП регулирующей автоматики и автоматизированной информационно-измерительной системы Comfort Contour компании "Данфосс", ведущего мирового производителя энергосберегающего оборудования. Инвестиционный проект общей стоимостью 77 млн. руб. позволит городской системе теплоснабжения приблизиться вплотную к европейским стандартам в области энергосбережения. Согласно расчетам экономистов, вложения окупятся всего за три года.

Проект был реализован теплосбытовой компанией "Воткинский завод" при поддержке муниципальной администрации и Министерства энергетики, ЖКХ и государственного регулирования тарифов Удмуртской Республики. Задача снижения затрат на теплоснабжение была обусловлена необходимостью сдерживания роста тарифов на отопление и горячее водоснабжение (ГВС) для населения в 2018–2025 гг. на уровне не выше инфляции. Программа модернизации ЦТП реализована в два этапа: с мая по ноябрь 2016 г. (пять ЦТП) и с апреля по август 2017 г. (17 ЦТП).

В ходе работ на центральных тепловых пунктах установлены алгоритмизированные контроллеры ECL Comfort 310 для систем отопления и ГВС, которые обеспечивают поддержание графика теплоснабжения и работу по заданной схеме погодной компенсации. Кроме того, в составе ЦТП использована широкая номен-

клатура вспомогательного оборудования и автоматической запорно-регулирующей арматуры компании "Данфосс", специалисты которой принимали непосредственное участие в проектировании технического решения для 22 городских ЦТП и подготовке технико-экономического обоснования. Это датчики температуры, регуляторы перепада давления и регулируемые клапаны. Большой объем работ был проведен с минимальными перебоями в поставке ресурсов потребителям. Проектно-монтажные и пусконаладочные работы выполняла компания "Протех" (г. Пермь).

После завершения модернизации управление оборудованием всех ЦТП и контроль режима теплоснабжения потребителей осуществляются дистанционно в режиме реального времени и без участия технического персонала. Это стало возможно благодаря внедрению системы диспетчеризации Comfort Contour Pro, применение которой одобрено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Если в 2016 г. численность операторов городских ЦТП составляла 92 чел., то к началу отопительного сезона 2017–2018 гг. потребность в техническом персонале для их обслуживания отпала полностью.

Таким образом, можно говорить о трех направлениях экономии, которые в сумме и обусловили высокую эффективность и быструю окупаемость модернизации. Помимо оптимизации работы городской системы теплоснабжения в соответствии с контролируемыми в режиме реального времени погодными колебаниями и потреблением, это дополнительное снижение потребления электроэнергии насосным оборудованием и 100-процентное сокращение персонала.

[Http://www.energy2020.ru](http://www.energy2020.ru)