

На правах рукописи

Пещеров Руслан Олегович



**ЦИФРОВОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ОНЛАЙН УПРАВЛЕНИЕ
НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С УЧЕТОМ
СИСТЕМНЫХ ФАКТОРОВ КАНАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в технических системах)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ушаков Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты: Имаев Дамир Хабибович,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина),
профессор кафедры Автоматики и
процессов управления

Бураков Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения,
доцент кафедры Управления в технических
системах Института инновационных
технологий в электромеханике и
робототехнике

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Радар ммс»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 28 декабря 2017 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.227.03 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, ауд. 359.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49 и на сайте: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=146119

Автореферат разослан «23» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.03
кандидат технических наук, доцент



Дударенко Наталия Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Тема диссертации вызвана потребностью и желанием исследования и развития цифрового дистанционного онлайн управления уникальным технологическим оборудованием, характеризующимся большой рассредоточенностью на территории нашей страны. Рассмотрение задач организации и проблем реализации цифрового дистанционного управления непрерывными техническими объектами является одной из наиболее интересных и важных тем современных теории автоматического управления и кибернетики [Андриевский Б.Р., 2015, Матвеев А.С., 2010, Фрадков А.Л., 2008], в сочетании с теорией информации [Морелос-Сарагоса, 2005] и криптографией [Хорлеман-Траутман, 2011].

Данная диссертация берёт во внимание цифровое управление в режиме онлайн – в режиме реального времени, когда канальная среда является не коммутируемой и монополизированной процессом управления, т.е. конкретную среду занимает один конкретный процесс управления. В большинстве случаев дистанционное управление является диспетчеризованным, т.е. осуществляемое операторами-диспетчерами, которые пользуются, в основном, средствами SCADA-систем. Однако, ситуация качественно меняется, когда встаёт задача об управлении уникальным оборудованием на больших расстояниях – десятках, сотнях и даже тысячах километров, так как дистанционное управление может вестись не только в пределах завода, но и отдельного региона, а также страны в целом. Дистанционное управление на таких расстояниях обслуживается не распространенными интерфейсными средствами, а телемеханическими низкоскоростными протоколами, или системами телемеханики, как они назывались ранее. И при работе с такими протоколами и на таких расстояниях необходим учёт специфических системных факторов канальной среды. В случае управления с помощью коммутируемой канальной среды стоит учитывать стохастическую природу доступа к ней, и, следовательно, замедление скорости передачи информации. Искажения в канальной среде всегда имеют место, это физическая данность. Учитывать их необходимо даже, если они характеризуются малыми вероятностями возникновения. Данная работа решает основные проблемы такого управления, а также даёт методы их решения на конкретных примерах.

Степень разработанности темы. Тема разрабатывалась на теоретическом уровне, начиная с Клода Шеннона, а также в работах Андриевского Б.Р., Фрадкова А.Л., Матвеева А.С., в основном, применительно к проблемам организации канальной среды. Поставленная в диссертации проблема по своему содержанию ставит задачу организации дистанционного управления с учётом факторов канальной среды как системного компонента, которой на качество процессов управления количественно регламентируется степень влияния ГОСТами РФ и международными стандартами.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является комплексное решение задач организации дистанционного управления с учётом системных факторов канальной среды как системного компонента, влияние которого на

качество процессов управления количественно регламентируется степенью влияния ГОСТов РФ и международными стандартами.

Проведенные диссертационные исследования представляют собой попытку систематизации системных факторов канальной среды, создание методов синтеза систем цифрового дистанционного онлайн управления с учётом этих факторов, а также формирование алгоритмов по решению сопутствующих проблем.

Научная новизна. В диссертационной работе новым является следующее:

- совокупность системных факторов канальной среды, которые влияют на качество цифрового дистанционного онлайн управления непрерывными техническими объектами;

- способ увеличения пропускной способности канальной среды путем сокращения размерности помехозащищаемой части кодовой посылки;

- способ аналитической оценки интервальности такого параметра как интервал дискретности цифрового дистанционного управления, использующего интерфейсы с помехозащитой в форме обнаружения, а не исправления искажений;

- алгоритм адаптации показателей типовых полиномиальных динамических моделей к задаче цифрового дистанционного управления с учетом факторов канальной среды;

- решение задачи запаздывания по входу и выходу непрерывного технического объекта путем увеличения на два порядка его дискретной модели;

- алгоритм синтеза цифрового онлайн дистанционного управления непрерывным техническим объектом на основе использования последовательного компенсатора.

Теоретическая и практическая значимость работы. Планируемым результатом проведенных диссертационных исследований является использование разработанных методов и полученных алгоритмов для проектирования систем управления, и внедрение синтезированных систем в готовое производство. Области возможного использования данной диссертации выступают электроэнергетика, приборостроение, машиностроение и т.д. Ввиду того, что системы управления и автоматизации сейчас присутствуют повсеместно, то теоретические разработки и практические рекомендации данной работы будут полезны и необходимы всем специалистам технического профиля. Инженеры-системщики и инженеры-канальщики, т.е. специалисты по разработке канальных сред управления, получают существенную теоретическую и практическую базу для своей работы, так как она сочетает несколько областей техники, которые на данный момент нуждаются в развитии.

Одним из практических применений проекта является система цифрового дистанционного онлайн управления положением лопастей поворотной лопастной гидравлической турбины типа ПЛ30-В-930 на Воткинской ГЭС в задаче стабилизации частоты промышленного тока.

Методология и методы исследования. При проведении исследований проекта используются: возможности теории Клода Шеннона по передаче информации по дискретным каналам связи с помехами; аппарат типовых полиномиальных моделей желаемого поведения технического объекта в составе системы; методы помехозащитного кодирования; формализм метода пространства состояний в рамках модального управления и динамического наблюдения применительно к задачам управления непрерывными и дискретными техническими объектами; методы аналитического конструирования последовательных компенсаторов; методы стохастической динамики непрерывных и дискретных процессов; теории вероятности.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся комплексное решение задачи цифрового дистанционного онлайн управления непрерывными техническими объектами с учетом системных факторов канальной среды, положениями которой являются:

- выявление совокупности системных факторов канальной среды, которые влияют на качество цифрового дистанционного онлайн управления непрерывными техническими объектами;
- способ увеличения пропускной способности канальной среды путем сокращения размерности помехозащищаемой части кодовой посылки;
- способ аналитической оценки интервальности такого параметра как интервал дискретности цифрового дистанционного управления, использующего интерфейсы с помехозащитой в форме обнаружения, а не исправления искажений, необходимый для учёта специфики сетей;
- алгоритм синтеза цифрового онлайн дистанционного управления непрерывным техническим объектом на основе использования последовательного компенсатора;
- выявление совокупности системных проблем, порождаемых кратковременным нарушением–восстановлением нормального функционирования канальной среды;
- система цифрового онлайн дистанционного управления положением лопастей поворотно-лопастной гидравлической турбины типа ПЛ30-В-930 в задаче стабилизации частоты промышленного тока.

Степень достоверности и апробация работы.

Работа выполнена на кафедре систем управления и информатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались всероссийских и международных конференциях: Всероссийский Конгресс Молодых Учёных (Россия, Санкт-Петербург, 8-11 апрель 2014); XII Всероссийское совещание по проблемам управления (Россия, Москва, 16-19 июня 2014); 3rd International Conference on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications (Италия, Флоренция, 22-24 ноября 2014); Всероссийский Конгресс Молодых Учёных (Россия, Санкт-Петербург, 7-10 апреля 2015); 6th European Conference of Computer Science (ECCS '15) (Италия, Рим, 7-9 ноября 2015); Российская

мультиконференция "Информационные технологии в управлении" (Россия, Санкт-Петербург, 4-6 октября 2016); 8th International congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT) (Португалия, Лиссабон, 18-20 октября 2016).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации отражены в 12 опубликованных статьях: 2 в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 7 в журналах и изданиях, входящих в перечень РИНЦ, из них 4 также в перечень ВАК, и ещё 3 в сборниках трудов российских и зарубежных конференций. Все публикации подготовлены при непосредственном участии автора.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 120 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, и списка литературы (100 наименований), содержит 11 таблиц и 20 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен анализ существующих в современной науке об управлении методов в обозначенной предметной области, сформулированы цели и задачи исследований, кратко изложены теоретические и практические результаты работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматривается процедура синтеза цифрового локального управления непрерывным техническим объектом (НТО), на основе его дискретного (цифрового) модельного представления, претерпевающего модификации при цифровом дистанционном онлайн управлении и оценке достижимых показателей качества системы с использованием теоремы Котельникова–Шеннона.

Постановка задачи. В диссертации рассматривается задача синтеза цифрового дистанционного онлайн управления непрерывным техническим объектом, решение которой реализуется в двух вариантах:

- в виде комбинации обратных связей по вектору состояния (и выхода) НТО и прямых связей по экзогенному (задающему) воздействию (или ошибке его воспроизведения), алгоритмически поддерживаемая средствами метода модального управления;
- в виде последовательного компенсатора (ПК), алгоритмически поддерживаемая средствами аналитического конструирования ПК.

Оба варианта синтеза опирается на концепцию полиномиальной динамической модели (ПДМ), обладающей желаемыми динамическими показателями качества процессов в переходном и установившемся режимах, выполняющей функцию эталонной модели, передаточная функция которой приводится ниже в виде представления (1). В случае использования первого варианта синтеза цифрового дистанционного онлайн управления ПДМ задается с использованием векторно-матричного формализма метода пространства состояний в форме

$$\dot{z}(t) = \Gamma z(t) + Eg(t), \eta(t) = Hz(t), \quad (1)$$

в которой векторные и матричные компоненты согласованы по размерности с такими же компонентами НТО. В случае использования последовательного компенсатора для построения устройства управления НТО носителем желаемых динамических показателей проектируемой системы становится передаточная функция прямой ветви системы в виде

$$W(s, \omega_0) = \frac{\Phi(s, \omega_0)}{1 - \Phi(s, \omega_0)} = \frac{v_n \omega_0^n}{s^n + \sum_{i=1}^{n-1} v_i \omega_0^i s^{n-i}}. \quad (2)$$

Во **второй главе** описываются системные факторы канальной среды в задачах формирования цифрового дистанционного онлайн управления, оценки их влияния на размерность дискретного представления исходного непрерывного технического объекта и на длительность интервала дискретности, а также на процедуру синтез цифрового дистанционного онлайн управления с учётом этих факторов при использовании последовательных интерфейсов.

Наличие канальной среды в задаче цифрового дистанционного онлайн управления при передаче сигналов, а также приемником помех, создаваемых физическими средствами на всей ее протяженности, порождает необходимость учитывать следующие системные факторы:

1. Осуществление четырехфазного преобразования «параллельный – последовательный» при передаче и «последовательный – параллельный» при приеме в прямом и обратном каналах связи терминальными аппаратными средствами с временными затратами, равными длительности преобразуемого кода в каждом из каналов связи;

2. Использование при передаче помехозащищенных кодов, что приводит к увеличению формата передаваемого кода за счет введения в его состав проверочных разрядов;

3. Осуществление коррекции обнаруженных искажений передаваемых помехозащищенных кодов с временными затратами, определяемыми способом организации коррекции;

4. Осуществление обмена информацией в «дуплексной» или «полудуплексной» формах в зависимости от конкретных свойств используемого последовательного интерфейса (телемеханического протокола), сопровождающееся дополнительными временными затратами;

5. Выполнение процедуры скремблирования – дескремблирования передаваемой – принимаемой кодовой комбинации цифрового сигнала управления для обеспечения синхронной работы генераторов передающей и принимающей сторон, требующее дополнительных временных затрат;

6. Использование динамического наблюдающего устройства при формировании сигнала управления даже в случае полной непосредственной

измеримости компонентов вектора состояния в силу скалярной природы канальной среды.

В третьей главе оцениваются возможности повышения пропускной способности канальной среды с целью повышения качества цифрового дистанционного онлайн управления непрерывным техническим объектом путём «разгрузки» канальной среды на основах расчётного и реализационного форматов помехозащищенного кода. Также в главе рассматривается системная интервальность, вносимая канальной средой, помехозащита в которой организована в форме обнаружения искажений.

В силу реально существующей помеховой среды и допустимой погрешности можно ускорить информационный обмен в задаче дистанционного онлайн управления. На первом этапе формируются расчетные форматы кодов, которые приведены в таблице 1 ($P_{\text{доп}}$ – допустимая вероятность приема ложной команды; n_p – разрядность; p - вероятность искажения одного бита передаваемого кода). На втором этапе расчетные форматы погружаются в среду модулярных над полем двоичным Галуа GF(2) неприводимых многочленов, построенных по БЧХ-технологии с целью выбора образующего многочлена кода, приводящего к переформатированию кодов. На последнем этапе форматированные ПЗК подвергаются процедуре укорачивания кодов.

Таблица 1

n_p	$P_{\text{доп}}=10^{-14}$			$P_{\text{доп}}=10^{-10}$			$P_{\text{доп}}=10^{-7}$		
	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$
8	(27,8)	(21,8)	(18,8)	(21,8)	(18,8)	(15,8)	(18,8)	(15,8)	(12,8)
12	(33,12)	(27,12)	(23,12)	(27,12)	(23,12)	(20,12)	(23,12)	(20,12)	(17,12)
16	(36,16)	(32,16)	(28,16)	(36,16)	(28,16)	(25,16)	(28,16)	(25,16)	(21,16)

Например, если в соответствии с техническим заданием на разработку дистанционного управления достаточным является удовлетворение случайной погрешности $\Delta=0,4\%$ (данный показатель можно выразить из заданной точности работы системы), то можно ограничиться проверкой только 8-ми информационных разрядов ($1/256 \cdot 100\% = 0.4\%$).

В таблице 1, например, для значений $\{n_p=16; P_{\text{доп}}=10^{-14}; p=10^{-5}\}$ расчётный код есть (28, 16), а путём преобразования ((18, 8), 8) будет равен (26, 16). Таблица 2 содержит итоговые результаты преобразования формата ПЗК.

Таблица 2

n_p	$P_{\text{доп}}=10^{-14}$			$P_{\text{доп}}=10^{-10}$			$P_{\text{доп}}=10^{-7}$		
	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$	$p=10^{-3}$	$p=10^{-4}$	$p=10^{-5}$
8	(27,8)	(21,8)	(18,8)	(21,8)	(18,8)	(15,8)	(18,8)	(15,8)	(12,8)
12	(31,12)	(25,12)	(22,12)	(25,12)	(22,12)	(19,12)	(22,12)	(19,12)	(16,12)
16	(35,16)	(29,16)	(26,16)	(29,16)	(26,16)	(23,16)	(26,16)	(23,16)	(20,16)

Чтобы убедиться в эффективности метода, можно провести сравнительный анализ таблиц 1 и 2. Например, для значений $\{n_p=16;$

$P_{\text{доп}} = 10^{-14}$; $p = 10^{-4}$ } расчётный код есть (32, 16), а преобразованный – (29, 16). Наблюдается существенное уменьшение – целых три разряда, что увеличит пропускную способность канала связи приблизительно на 10%.

В режиме обнаружения ошибок в силу фактора повторов информационных посылок обмен информацией между устройством управления и обслуживаемым технологическим оборудованием будет осуществляться не с фиксированным интервалом дискретности, а с переменным (интервальным) интервалом дискретности. Необходимо отметить, что в последнее время канальная среда, реализуемая средствами современной интерфейсной техники, широко использует помехозащиту в режиме обнаружения, обеспечиваемой CRC–технологией (CRC – Cyclic Redundancy Codes – избыточные циклические коды). Воспользуемся концепцией К. Шеннона о том, что при заданной шумовой среде в каналах связи и при заданной допустимой вероятности приёма ложной команды, для обеспечения последнего условия требуется увеличение длительности передачи информации по сравнению со случаем отсутствия помех в канале связи. Это увеличение технически может быть реализовано в двух формах:

1) увеличение времени передачи за счёт увеличения числа повторов в режиме обнаружения ошибок,

2) увеличение времени передачи за счёт увеличения числа проверочных разрядов помехозащищённого кода, приводящих к увеличению его размерности, что требует большего времени для его передачи

Оба способа должны дать один и тот же результат в среднем на передаваемую посылку. Это положение является ключевым для количественной оценки возникающей интервальности такого системного параметра как интервал дискретности. Интервальное трёхкомпонентное представление интервала дискретности принимает вид

$$[\Delta t] = \Delta t_0 + [\Delta(\Delta t)] = \Delta t_0 + [\underline{\Delta\Delta t}, \overline{\Delta\Delta t}], \quad (3)$$

где Δt_0 - медианная составляющая интервала дискретности, определяемая соотношением $\Delta t_0 = \Delta t_b \cdot n_s$, а $[\Delta(\Delta t)]$ - интервальная составляющая интервала дискретности с симметричными, но разными по знаку левым и правым граничными компонентами так, что $\underline{\Delta\Delta t} = (n_r - n_s)\Delta t_b$, $\overline{\Delta\Delta t} = (n_s - n_r)\Delta t_b$, n_s, n_r - полное число разрядов реального и виртуального помехозащищённых кодов.

Такое представление позволяет вычислить оценку относительной интервальности, задаваемой в форме

$$\delta_I \Delta t = |\Delta\Delta t| / |\Delta t_0|. \quad (4)$$

В таблице 3 представлено сравнение рассчитанных интервальностей такого параметра как интервала дискретности для различных интерфейсов. Виртуальный ПЗК получен из реального ПЗК путем изменения режима помехозащиты с исправления на обнаружение.

Таблица 3

Интерфейс	Реальный ПЗК	Виртуальный ПЗК	$[\Delta t]$	$\delta_T \Delta t$
RS-485	(24,16)	(31,16)	$31 + [-7, 7]$	22.6 %
CAN	(31,16)	(52,16)	$52 + [-21, 21]$	40.4 %
USB 2.0	(32,16)	(34,16)	$34 + [-2, 2]$	5.9 %

В четвёртой главе исследуются ситуации кратковременного нарушения нормального функционирования цифрового дистанционного онлайн управления непрерывным техническим объектом, при которых в случае восстановления нормального его функционирования возникают временные интервалы свободного движения непрерывной системы, характеризующегося при использовании желаемой модели системы с распределением Ньютона мод системы заметные выбросы в траекториях движения. В главе также решается общая задача повышения качества цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом при кратковременных нарушениях–восстановлениях его нормального функционирования.

Возьмём произвольную систему дистанционного управления с НТО, обладающую устойчивостью нейтрального типа, в переходном режиме. На рисунке 1.a приведена кривая выходного сигнала данной системы. На рисунках 1.b, 1.c приведены кривые выходного сигнала той же системы при линейно нарастающем и гармоническом входных сигналах соответственно. На рисунке 1.d представлена кривая режима ненулевого начального состояния и нулевого внешнего воздействия. Во всех случаях разрыв в прямом и обратном каналах связи происходит в интервале $[0.5t_{п}; t_{п}]$. На всех графиках заметны существенные сигнальные выбросы, которые в физическом смысле могут стать причиной аварии.

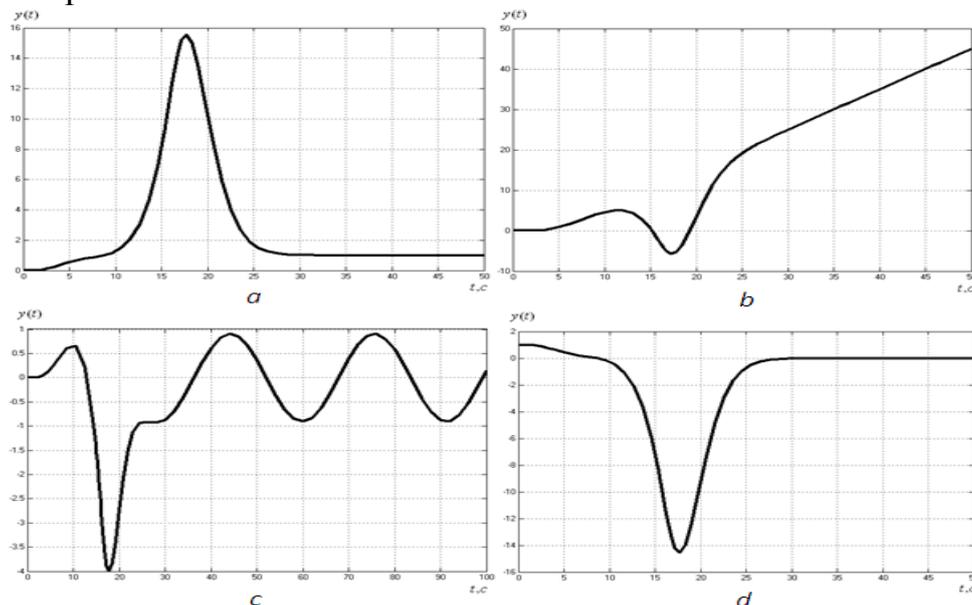


Рисунок 1 – Кривые выходных сигналов с выбросами

Для решения проблемы данных выбросов, диссертант предлагает ввести автономный автомат обнулений начальных состояний, размещаемый в непосредственной близости непрерывного технического объекта. В физическом смысле им может быть прибор, запоминающий текущее состояние объекта, и способный его обнулить при восстановлении рабочего состояния.

На рисунках 2 представлены те же процессы в системе при нарушении-восстановлении нормального функционирования нормальной среды, дополненной процедурой обнуления начального состояния системы. Из графиков заметно, что все выбросы исчезли, и система нормально функционирует во всех режимах.

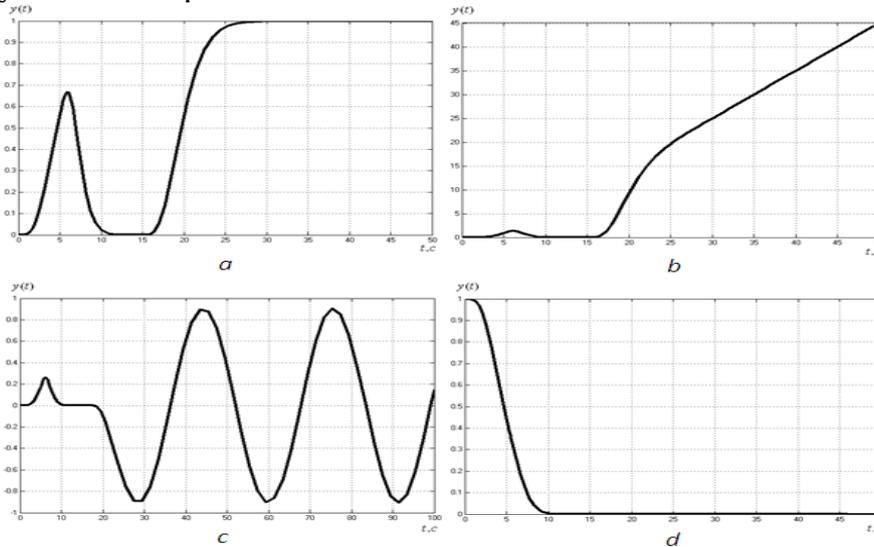


Рисунок 2 – Кривые выходных сигналов после введения автомата обнулений

В пятой главе приводится решение прикладной задачи цифрового дистанционного онлайн управления с учётом факторов канальной среды. При решении прикладной задачи разработан алгоритм синтеза последовательного компенсатора системы дистанционной стабилизации частоты электрического тока в условиях стохастического внешнего источника ее возмущения, для чего конструируется формирующий фильтр третьего порядка сложного стохастического внешнего возмущения с доминированием гармонической составляющей случайной амплитуды. Предыдущие главы стали опорой в создании алгоритма синтеза и выборе метода решения прикладной задачи.

В качестве прикладной проблемной области полученных при выполнении проекта результатов диссертант выбрал задачу участия в подготовке технических предложений по разработке системы дистанционного управления гидроагрегатом с поворотной-лопастной гидротурбиной ПЛ30-В-930 в составе гидроагрегатов Воткинской ГЭС с целью регулирования частоты генерируемой электроэнергии, качество которой должно соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97.

Предметом синтеза на уровне непрерывных аналитических представлений и дискретных технических реализаций является схема системы на рисунке 3, на которой передаточная функция $W(s, \omega_0)$, параметризованная частотой ω_0 , реализуются с помощью последовательного компенсатора с

помощью передаточной функции $W_{\text{ПК}}(s, \omega_0)$. Предпочтение последовательного компенсатора методу модального управления диссертантом отдано в связи с меньшими информационными затратами на его реализацию, т.е. меньшим числом затрачиваемых разрядов, и отсутствием проблемы ненулевых начальных условий дистанционно управляемого объекта (приводы лопастей), возникающих при кратковременных нарушениях в канальной среде, используемой при организации дистанционного управления.

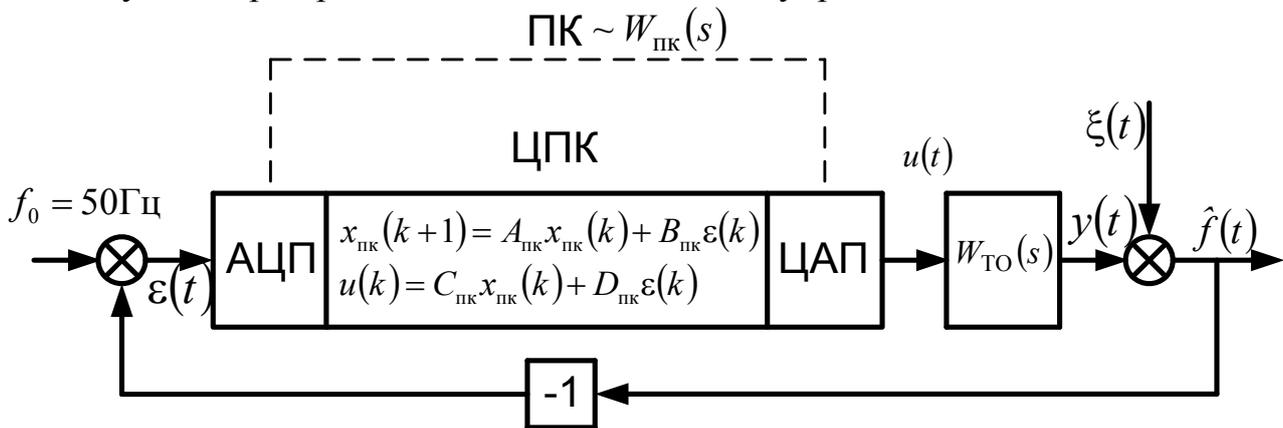


Рисунок 3 – Структурная схема проектируемой системы

Алгоритм синтеза:

0. Сформировать требования к показателям системы дистанционной стабилизации частоты электрического тока в переходном и стационарном режимах в виде:

01. величины длительности переходного процесса, удовлетворяющей условию $t_{\text{П}} \leq t_{\text{ПР}}$

02. величины перерегулирования, удовлетворяющего условию $\sigma = 0\%$

03. добротности по скорости, удовлетворяющей условию $D_1 \geq D_{1\text{Р}}$

04. на основании предположений «гауссовской» природы возмущения $\xi(t)$, допускающего использования правила «трёх сигм», колебания частоты питающего тока, удовлетворяющего условию $3\sigma_{\Delta f} \leq 0.05 \text{ Гц}$ (В соответствии с ГОСТ Р 55890-2013), что эквивалентно обеспечению относительного значения $\bar{\sigma}_{\Delta f}$ среднеквадратического отклонения регулируемой частоты, удовлетворяющего неравенству

$$\bar{\sigma}_{\Delta f} = \sigma_{\Delta f} / \sigma_{\xi} \leq 0.1 \quad (5)$$

05. размерности n_d аппаратных средств сигнальной среды

1. Получить от заказчика параметры канальной среды в виде:

1.1. длительности бита Δt_b

1.2. характера помехозащиты

1.3. характера организации информационного обмена

2. Сформировать агрегированный интервал дискретности (АИД) Δt , с которым будет осуществляться информационный обмен в процессе цифрового дистанционного управления лопастями гидротурбины.

3. Сформировать значение характеристической частоты ω_0 , удовлетворяющему условию

$$\omega_0 = \max\{\omega_0 = \arg(t_{\Pi} \leq t_{\Pi R}), \omega_0 = \arg(D_1 \geq D_{1R})\} \quad (6)$$

4. Задать желаемую модель синтезируемой системы на рисунке 3 с помощью передаточной функции (ПФ) «вход-выход» (ВВ), параметризованную характеристической частотой ω_0

$$\Phi(s, \omega_0) = \frac{v_n \omega_0^n}{s^n + \sum_{i=1}^n v_i \omega_0^i s^{n-i}} = \frac{v_n \omega_0^n}{D(s, \omega_0)}, \quad (7)$$

$$\text{где } v_i = C_n^i (i = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Основным преимуществом в представлении передаточной функции $\Phi(s, \omega_0)$ в форме (7) является то, что её использование сводит задачу синтеза к однопараметрической задаче поиска значения характеристической частоты ω_0 , от которой зависит длительность переходного процесса, добротность, частота среза, полосы пропускания, а также при фиксированных параметрах стохастического внешнего воздействия значения дисперсий и среднеквадратических отклонений ошибки и выхода системы, от конкретной реализации набора коэффициентов v_i зависит запас устойчивости по фазе, величина перерегулирования, показатель колебательности и число полуколебаний время переходного процесса.

5. Сформировать дискретное представление формирующего фильтра

$$W_{\phi\phi}(s) = W_{\phi a}(s) \cdot W_{\phi\kappa}(s) = \frac{\Omega_a}{s + \Omega_a} \cdot \frac{\Omega_\kappa^2}{s^2 + 2\zeta\Omega_\kappa s + \Omega_\kappa^2} \quad (9)$$

с помощью оператора $s2d$, положив при переходе значение АИД Δt .

6. Сформировать дискретное представление передаточной функции (7) с помощью оператора $s2d$, положив при переходе значение АИД Δt .

7. Агрегировать дискретную модель п.5 формирующего фильтра (9) и дискретную модель п.6 передаточной функции (7) с целью экспериментальной проверки условия (5). В случае выполнения условия, перейти к п.8, в случае его невыполнения перейти к п.3 и нарастить значения ω_0 .

8. Сформировать передаточную функцию прямой ветви $W(s, \omega_0)$ проектируемой системы в силу соотношения (2).

9. Сформировать передаточную функцию $W_{\text{ТО}}(s)$ привода поворотного механизма лопастей турбины.

10. Сформировать передаточную функцию $W_{\text{ПК}}(s, \omega_0)$ последовательного компенсатора, доставляющего проектируемой системе требуемые показатели качества с помощью соотношения

$$W_{\text{ПК}}(s, \omega_0) = \frac{W(s, \omega_0)}{W_{\text{ТО}}(s)} \quad (10)$$

11. Проверить физическую реализуемость передаточной функции (10). В случае невыполнения переход к пункту 4 с целью увеличения порядка n , иначе к пункту 12.

12. С помощью процедуры $c2d$ при АИД Δt построить дискретное представление модели привода механизма лопастей на основе передаточной функции $W_{\text{ТО}}(s)$ и дискретное представление последовательного компенсатора.

13. Провести комплексное исследование спроектированной системы цифрового дистанционного управления частотой электрического тока в региональной подсистеме ЕЭС в условиях стохастических возмущений сложного состава.

На основе алгоритма, составленного автором, проведён компьютерный эксперимент в модельной оболочке Simulink. На рисунке 8 представлен график реализации стохастического дискретного процесса стабилизации частоты $f(k) = 50 + \Delta f(k)$ электрического тока средствами спроектированной системы.

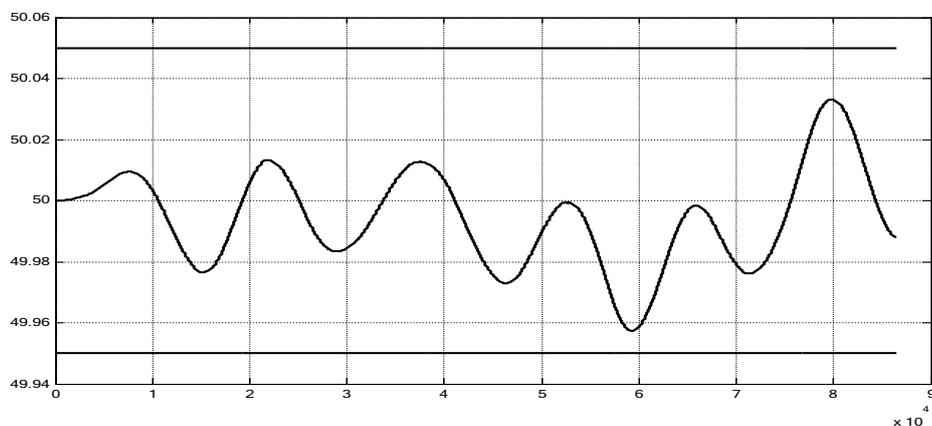


Рисунок 4 – Реализация стабилизации частоты спроектированной системой

Комплексное компьютерное исследование спроектированной системы цифрового дистанционного управления гидроагрегатным комплексом в задаче стабилизации частоты питающего напряжения в сети электроснабжения в условиях совокупного стохастического воздействия показало, что она обеспечивает стабилизацию частоты в полном соответствии с требованиями ГОСТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В своей основе задачи, поставленные перед диссертантом при формировании темы диссертационных исследований, решены, при этом получены следующие результаты:

1. Сформирована совокупность системных факторов канальной среды, которые влияют на качество цифрового дистанционного онлайн управления непрерывными техническими объектами;

2. Предложен способ увеличения пропускной способности канальной среды путем сокращения размерности помехозащищаемой части кодовой посылки в прямом и обратных каналах;

3. Разработан аналитический способ оценки интервальности такого системного параметра как интервал дискретности цифрового дистанционного

управления, использующего интерфейсы с помехозащитой в форме только обнаружения, а не исправления искажений;

4. Сформирована алгоритмическая база синтеза цифрового онлайн дистанционного управления непрерывным техническим объектом как на основе модального управления, так и на основе последовательного компенсатора;

5. Разработана системная проблема, порождаемая кратковременным нарушением–восстановлением нормального функционирования канальной среды;

6. Разработана система цифрового онлайн дистанционного управления положением лопастей поворотно-лопастной гидравлической турбины типа ПЛЗО–В–930 в задаче стабилизации частоты промышленного тока.

Автор удовлетворен проделанной работой и полученными результатами, однако остались и идеи по дальнейшему развитию рассмотренной темы. В частности, интересно исследование системной интервальности, вносимой канальной средой, помехозащита в которой организована в режиме исправления ошибок. Также стоит отметить, что основной результат сориентирован на возможности телемеханических протоколов, и весьма заманчивым представляется его распространение на интернет, как наиболее популярную систему объединённых компьютерных сетей для хранения и передачи информации.

Публикации по теме диссертации

Научные издания, входящие в перечень российских рецензируемых журналов:

1. Пещеров, Р.О. Интервальность параметров систем дистанционного управления, порождаемая режимом обнаружения ошибок в канале связи / Р.О. Пещеров, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т.17. – № 3. – С.506–513. – 0,4375 п.л. / 0,146 п.л.

2. Пещеров, Р.О. Исследование особенностей траекторий свободного движения непрерывной системы в форме последовательной цепочки однотипных апериодических звеньев / Р.О. Пещеров, Н.А. Вундер, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т.16. – №1(101). – С.68-75. – 0,5 п.л. / 0,125 п.л.

3. Пещеров, Р.О. Фактор аппаратной среды передачи сигнала управления объекту в задаче синтеза дискретных систем / Р.О. Пещеров, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т.15. – № 4(98). – С.685-694. – 0,625 п.л. / 0,208 п.л.

4. Пещеров, Р.О. Пропускная способность канала связи как гарантия качества цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом / Р.О. Пещеров, Е.С. Лихолетова, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т.58. – №9. – С.751-758. – 0,5 п.л./0,125 п.л.

Научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

5. Peshcherov, R.O. Free motion of sequence of similar aperiodic blocks / R.O. Peshcherov, N.A. Vunder, O.S. Nuyya, A.V. Ushakov // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2016. – pp.26-29. – 0,3125 п.л. / 0,078 п.л.

6. Peshcherov, R.O. Factors of the channel medium, problem of digital remote control of continuous technological resources / R.O. Peshcherov, E.S. Liholetova, O.S. Nuiya, A.V. Ushakov // Proceedings of the 3rd International Conference on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications, Florence. – 2014. – pp.68–72. – 0,3125 п.л. / 0,078 п.л.

Публикации в иных изданиях:

7. Пещеров, Р.О. Фактор кратковременного прекращения нормального функционирования канальной среды в задаче цифрового дистанционного управления / Р.О. Пещеров, Н.А. Вундер, О.С. Нуйя // Материалы конференции "Информационные технологии в управлении". – 2016. – С.515-522. – 0,5 п.л. / 0,167 п.л.

8. Peshcherov, R.O. Capacity of Communication Channel as a Quality Guarantee of Digital Remote Control of Continuous Technical Plant / R.O. Peshcherov, E.S. Liholetova, O.S. Nuiya, A.V. Ushakov // Proceedings of the 6th European Conference of Computer Science. – 2015. – pp.170–175. – 0,375 п.л./0,094 п.л.

9. Пещеров, Р.О. О возможности «разгрузки» канальной среды в задаче дистанционного управления [Электронный ресурс] / Р.О. Пещеров // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. – 2015. – 0,125 п.л. / <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1140/1140.pdf>

10. Пещеров, Р.О. Временные затраты на коррекцию искажений кодов как системный фактор в задаче цифрового дистанционного "online" управления / Р.О. Пещеров, Е.С. Лихолетова, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // Материалы конференции "Информационные технологии в управлении". – 2014. – С.501–511. – 0,625 п.л. / 0,156 п.л.

11. Пещеров, Р.О. Канал связи как системный фактор возможной недостижимости желаемых динамических показателей системы цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом / Р.О. Пещеров, Е.С. Лихолетова, О.С. Нуйя, А.В. Ушаков // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – 2014. – С. 7131-7136. – 0,375 п.л. / 0,094 п.л.

12. Пещеров, Р.О. Оценка достижимости требуемых динамических показателей системы цифрового дистанционного управления с использованием отечественных телемеханических протоколов в дуплексном режиме РРР и коррекцией искажений в темпе канального времени / Р.О. Пещеров // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 1. – 2014. – С.285-286. – 0.125 п.л.