

Производительность современных компьютеров такова, что данный недостаток в большинстве случаев несущественен.

Системы, построенные на базе калмановских сетей, позволяют адекватно моделировать объекты различной степени сложности, обеспечивают устойчивость к ошибкам во входных данных и обладают улучшенной обобщающей способностью.

#### Список использованных источников

1. Решетников В.Н. Космические телекоммуникации. (Системы спутниковой связи и навигации). – М.: 2010. – 134 с.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением (редакция 5.1). – М., 2008.
3. Сучилин В.И., Волобуев Г.Б. Оценка возможностей повышения точности местоопределения наземного подвижного объекта путем вторичной обработки показаний аппаратуры пользователя систем GPS NAVSTAR и/или ГЛОНАСС// Сб. докладов VIII Междунар. НТК «Кибернетика и высокие технологии XXI века». – Воронеж, 2007, т.2, с. 1066-1073.
4. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радио-

локации. Кн. 28. – М.: Радиотехника, 2009. – 432 с.

5. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 200 с.

6. Понятский В.М. Исследование способов реализации адаптивной системы управления с фильтром Калмана// Стохастическая оптимизация в информатике. 2008. Т. 4. № 1-1. С. 196-210.

7. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: ИД «Вильямс», 2001. – 288 с.

8. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с.

9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 1104 с.

10. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов/ В.А.Терехов, Д.В.Ефимов, И.Ю.Тюкин. – М.: Высш.шк. 2002. – 183 с.

11. Чернодуб А.Н., Новицкий Д.В., Дзюба Д.А. Прогнозирование временных рядов на основе одиночных нейронных сетей и комитетов нейронных сетей: сравнительный эксперимент// XIII Всеросс. НТК «Нейроинформатика-2011». – М., 2011, ч.2, с. 192-201.

Оренбургский государственный университет

УДК 681.513.2

## ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ НА БАЗЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОТОКОЛОВ

А.И.Бондаренко, А.Е.Сорокоумов

*Рассмотрена актуальность разработок в области промышленных сетевых технологий. Проведён сравнительный анализ протоколов на базе Ethernet, обоснован выбор базового набора протоколов. Рассмотрены практические аспекты построения прикладных приложений на базе проанализированных технологий.*

#### Введение\*

Основным вектором развития сетевых технологий является уменьшение времени отклика системы, увеличение надёжности и скорости передачи, а так же открытость (обеспечивает возможность, например, использовать устройства от разных производителей в рамках одной сети) [1].

Сегодня технология Ethernet, благодаря большой популярности, простоте применения, высоким техническим характеристикам, срав-

нительно невысокой стоимости компонентов, а так же ожидаемого стабильного роста, наиболее подходит для основы построения промышленных сетей.

Чаще всего Ethernet используется вместе со стеком протоколов TCP/IP, основополагающим в сети Internet. Такой подход обеспечивает возможность управлять цехом или предприятием, но не подходит для систем управления технологическим оборудованием, требующих жёсткого реального времени (режим работы системы, при котором нарушение временных ограничений равнозначно отказу системы).

#### Анализ промышленных протоколов на базе Ethernet

В табл. 1 приведены наиболее распространённые технологии построения распределённых промышленных сетей на базе Ethernet, а также организации, их разрабатывающие. Несмотря на то, что большая часть решений в этой области базируется на открытых стандартах, существует тенденция контролировать технологию одной компанией [2].

\* Работа выполнена по Госконтракту №14.132.21.1794 на проведение НИР в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг.

Таблица 1  
Распространённые промышленные сети на базе Ethernet

Технология	Организация	Класс	$t_{мин}$ (мс)
Modbus TCP	Modbus-IDA	A	10
EtherCAT	EtherCAT Technology Group (ETG)	C	0,01
SERCOS III	SERCOS international	C	0,03
Ethernet Powerlink	Ethernet Powerlink Standardization Group (EPSG)	B	0,1
PROFINet	Profibus and PROFINet International (PI)	A,B,C	0,25

Технологии классифицированы в зависимости от того, каким образом реализация ведомого устройства отличается от стандартного стека коммуникационных протоколов TCP/UDP/IP поверх технологии Ethernet. Класс А в полной мере базируется на основе стека протоколов TCP/UDP/IP, класс В подразумевает модификацию прикладного уровня (находится на вершине стека протоколов согласно сетевой модели ISO/OSI) для обработки данных в режиме реального времени, а класс С предполагает применение специальной аппаратной части в реализации устройств обмена. Покажем основные характерные черты каждой из упомянутых технологий.

PROFINet – модульная Ethernet технология, предлагающая несколько коммуникационных профилей в зависимости от требований к времени отклика. Для простых задач подойдёт PROFINet CBA (Component Based Automation), который представляет собой протокол класса А (не предполагает работы в реальном времени). PROFINet SRT (Soft Real Time, «мягкое» реальное время) обеспечивает работу в режиме реального времени (с некоторыми отклонениями от заданных величин) являясь протоколом класса В. PROFINet IRT (Isochronous Real Time) является протоколом класса С, гарантирует работу в режиме жёсткого реального времени.

Modbus TCP является версией коммуникационного протокола Modbus, реализованного на базе Ethernet технологии. Modbus – открытый, не требующий лицензионных отчислений стандарт, достаточно простой для разработки приложений. В то же время, он не накладывает значительных ограничений на производителей оборудования, поэтому достаточно широко применяется. Использование стандартного TCP/IP стека поверх Ethernet является стандартным подходом для сети класса А, что не гарантирует работу в режиме реального времени.

EtherCAT (Ethernet for Control Automation), это технология промышленного Ethernet, разработанная компанией Beckhoff (стандарт IEC 61158). В технологии EtherCAT используется

модель коммуникации «ведущий/ведомый». Оригинальная аппаратная часть ведомых узлов позволяет отнести протокол к решениям класса С (гарантирует работу в режиме жёсткого реального времени). Ведущее устройство, может быть разработано на основе стандартных Ethernet компонентов.

В настоящее время для решения задач простого ввода/вывода преимущественно используется протокол EtherCAT. Также стандарт применим для решения специальных задач связанных с управлением следящими приводами. Для этих целей на прикладном уровне используются системы параметров зарекомендовавших «приводных» протоколов, таких как SERCOS (SERCOS over EtherCAT – SoE) и CAN (CAN over EtherCAT – CoE).

Ethernet Powerlink (EPL) – стандарт, разработанный компанией Bernecker & Rainer Industrie Elektronik (B+R). В стандартной версии EPL является программным решением и использует только стандартное Ethernet оборудование, поэтому относится к сетям класса В.

Максимальное количество узлов в сети Powerlink ограничено 10 при использовании конфигурации «шина», что делает этот протокол неприемлемым при построении сложных решений. Кроме того, использование полудуплексного соединения и доступа в режиме циклического опроса (polling) снижает коммуникационные характеристики сети.

SERCOS III - это третье поколение стандартизированной (IEC 61508) открытой технологии построения распределённых промышленных сетей, широко распространённой в сфере промышленной автоматизации. Интерфейс реализован на базе подхода «ведущий/ведомый». Специализированное аппаратное обеспечение используется во всех устройствах сети, поэтому протокол является представителем сетей класса С (гарантирует жёсткое реальное время работы интерфейса).

Преимуществом протокола является возможность использования в рамках одной сети большого количества разнородных устройств – электроприводы, контроллеры, модули ввода/вывода, измерительная техника, TCP/IP устройства (удалённые терминалы, выносные станционные пульты).

Проведённый анализ показывает, что наиболее приспособленными для задач управления в режиме жёсткого реального времени являются протоколы EtherCAT и SERCOS. Благодаря их специализации, весьма перспективным представляется интеграция обоих интерфейсов в рамках одной системы (чтобы конфигурировать базовое решение под ту или иную функцио-

нальность). Именно по такому пути пошли разработчики отечественной системы ЧПУ класса Hi-End «АксиОМА Контроль».

### Особенности разработки приложений на базе протокола EtherCAT

Промышленный стандарт реализован на базе семиуровневой модели ISO\OSI (рис. 1). На физическом уровне применяется протокол Ethernet (EtherType 0x88A4), поддерживающий передачу данных на скорости свыше 100 Мбит/с [3].

На канальном уровне вместо протокола множественного доступа с контролем несущей и обнаружением коллизий, используемого в семействе протоколов Ethernet TCP/IP, реализован уровень управления доступом к среде передачи EtherCAT (EtherCAT Media Access Control), позволяющий передавать данные в режиме реального времени. Данный вариант управления достигается при условии передачи пакетов напрямую, «в обход» сетевого стека операционной системы и возможен в случае использования специализированных EtherCAT-драйверов уровня ядра операционной системы.

Другой подход, основанный на использовании сетевого стека операционной системы при передаче пакетов, а, следовательно, задействования для этой цели протоколов UDP/IP не гарантирует доставки данных в жёстко отведённые временные рамки быстрее, чем 1 мс.

EtherCAT-сеть строится на базе коммуникационной модели клиент-сервер. Мастер сети (ведущее устройство) организует обмен данными циклично. Данные EtherCAT передаются в виде кадров, упакованных в стандартные телеграммы Ethernet, но с большим приоритетом. Ведомые устройства в сети только выполняют команды ведущего[5].

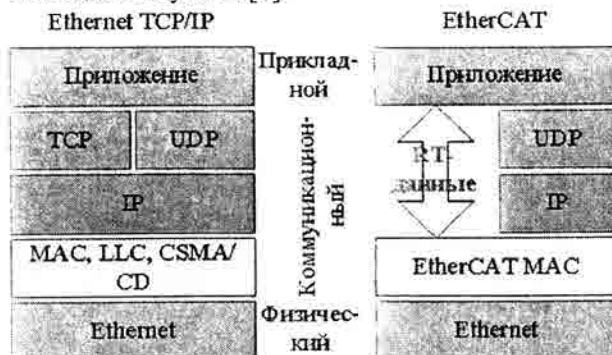


Рис. 1. Сравнение протоколов TCP/IP и EtherCAT

Сеть может быть организована в любую из возможных топологий (шина, кольцо, звезда). Наибольший интерес представляет сеть реализованная в виде общей шины, к которой возможно подключение различных ведомых уст-

ройств (удалённые входы/выходы, контроллеры электроавтоматики, сервоусилители, приводы главного движения). В качестве ведущего устройства сети может применяться программно-реализованный мастер, как правило, свободно распространяемый. Данное решение позволяет обеспечить независимость системы управления от конкретного производителя, а так же уменьшить её стоимость. Существует несколько open-source решений (распространяемых по лицензии GPL), среди которых можно выделить наиболее популярные: проект «Etherlab», разработанный группой инженеров Ingenieurgesellschaft IgH и проект под названием Simple Open EtherCAT Master (SOEM)[4].

На рис. 2, 3 представлены три варианта архитектур модуля управления EtherCAT-устройствами, предлагаемого для встраивания в систему числового программного управления. Рассмотрим подробнее каждый из них.

Первые два варианта (слева направо) основываются на применении решений разработчиков Etherlab, накладывают существенные ограничения на разработчиков – вариант, представленный на рис. 2,а не обеспечивает работу в реальном времени (за счёт использования «медленного» сетевого стека ОС), а реализация варианта, представленного на рис. 2,б, предполагает использование определённых моделей сетевых карт. В силу этих ограничений, оба варианта не рассматриваются [6].

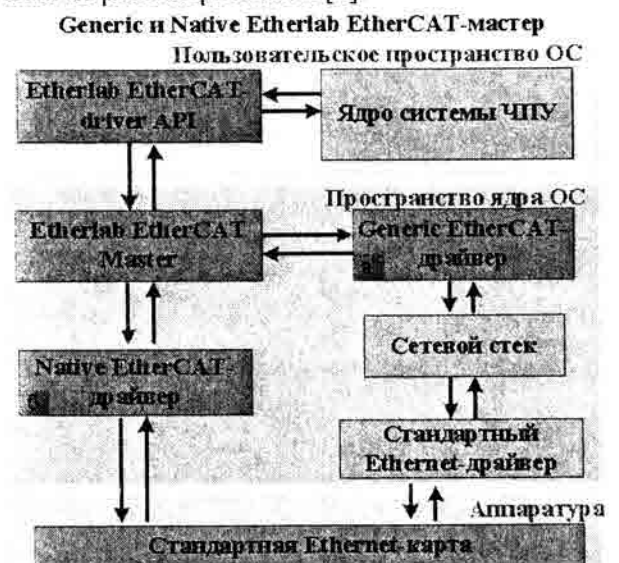


Рис. 1. Архитектура модуля управления устройствами EtherCAT

Третий вариант управления EtherCAT-устройствами при помощи драйвера SOEM основывается на применении технологии «сырых сокетов» (raw sockets), которая позволяет собирать TCP/IP-пакеты на уровне пользовательского пространства операционной системы по-

средством прикладного программного интерфейса (API), контролируя каждый бит заголовка и отправляя в сеть нестандартные пакеты. Данное решение является наиболее эффективным с точки зрения интеграции в системы управления, так как в этом случае разработчики не привязаны к конкретным версиям целевой ОС и моделям сетевых контроллеров (рис. 3).

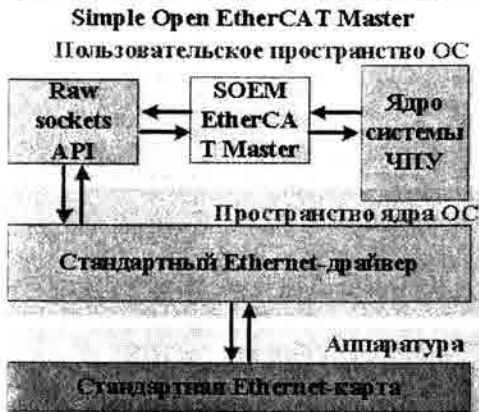


Рис. 3. Архитектура модуля управления устройствами EtherCAT

**Особенности разработки приложений на базе протокола SERCOS**

В основе интерфейса SERCOS лежит та же самая семиуровневая модель ISO/OSI (рис. 4). Особенность использования сетевого протокола в SERCOS интерфейсе заключается в том, что в нем комбинируются возможности стандартного Ethernet с возможностью работы в реальном времени в рамках технологии Industrial Ethernet [7].

В SERCOS III используется стандарт IEEE 802.3 (Ethernet type 0x88CD) для передачи сообщений в циклическом режиме (посредством телеграмм), при этом обеспечивается работа ведущий/ведомый, кросс-коммуникационного, и безопасного (safety) каналов управления.



Рис. 4. Структура протокола SERCOS III

Профили устройств включают в себя три основных класса функциональности [8]: про-

филь «Управление движением» (реализует функции и параметры для контроллеров, на базе SERCOS); приводной профиль (содержит функции и параметры для расширенной настройки и диагностики работы приводных устройств); профиль «Входы/выходы» предоставляет функции работы с различными устройствами ввода/вывода.

При использовании топологии шина ведущее устройство располагается в начале её или между двумя шинами. Данные проходят через каждое ведомое устройство и «поворачивают обратно» на последнем устройстве. Каждое ведомое устройство анализирует данные, которые проходят через него в обоих направлениях, таким образом гарантируется, что все данные будут доставлены «по адресу» в пределах одного цикла. Преимуществом такой топологии является простота и дешевизна эксплуатации.

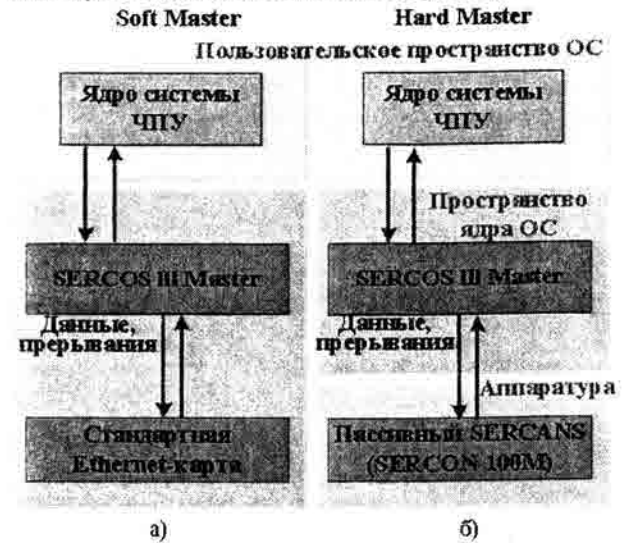


Рис. 5. Архитектура модуля управления SERCOS устройствами

Рассмотрим возможные способы построения архитектуры взаимодействия с SERCOS устройствами (рис. 5, 6). На рис. 5,а представлена версия на базе программно реализованного ведущего устройства (Soft Master). Этот вариант является небольшим «исключением» из правила, т.к. не гарантирует жёсткого реального времени. Преимуществом является использование стандартного Ethernet-контроллера. На рис. 5,б представлен вариант с пассивной платой SERCANS – вариант, при котором ведущее устройство реализуется «своими» силами при наличии ПЛИС SERCON 100M. В большинстве случаев, это может быть выгодно компаниям, ведущим собственную разработку электронных устройств [9].

Наиболее распространённый способ представлен на рис. 6, здесь ведущее устройство представляет собой плату расширения (напри-

мер, по шине PCI), которая устанавливается в персональный компьютер. Прикладная программа (на примере ядра системы ЧПУ) взаимодействует с ведущим устройством через драйвер уровня ядра операционной системы посредством двух портовой памяти с параллельным интерфейсом доступа и обработке прерываний.



Рис. 6. Архитектура модуля управления SERCOS устройствами

Было выбрано решение именно это решение, т.к. подобный подход позволяет на базе PCI-платы для персонального компьютера получить полноценную работу в режиме жёсткого реального времени.

#### Примеры промышленного применения рассмотренных решений

Как было показано в предыдущих разделах, выбранные подходы при разработке решений на базе протоколов EtherCAT и SERCOS позволяют построить архитектуру системы управления таким образом, что для перехода на тот или иной вид устройств требуется лишь загружать нужный модуль в состав ядра системы [10].



Рис. 7. Решение на базе протокола EtherCAT

На рис. 7 представлена аппаратная архитектура системы управления EtherCAT-оборудованием. Сервоусилители (приводы подачи), преобразователь частоты, устройство удалённых входов-выходов, подключены к общей цифровой шине. Управление всеми перечисленными устройствами осуществляется системой ЧПУ, реализованной на базе PC-платформы, со стандартной аппаратной конфигурацией. Роль ведущего устройства отведена программно-реализованному EtherCAT-мастеру, осуществляющего обмен с ведомыми устройствами посредством стандартного сетевого контроллера [11].

Для иллюстрации возможной архитектуры SERCOS протокола была представлена с большим количеством разнородных устройств — электроприводы, контроллеры, модули ввода/вывода, измерительная техника, TCP/IP устройства (удалённые терминалы, выносные станционные пульты, рис. 8) [12].



Рис. 8. Решение на базе протокола SERCOS

#### Заключение

Рассмотренные в статье подходы к реализации коммуникационной среды для связи различных исполнительных устройств на базе промышленных протоколов EtherCAT и SERCOS позволяют создавать системы, ориентированные на решение конкретных технологических задач, путём подключения к системе управления соответствующего задаче модуля. Благодаря такому подходу, архитектура системы остаётся неизменной — это позволяет сократить время интеграции системы ЧПУ на технологическом оборудовании, собранных из комплектующих от разных производителей, что существенно расширяет потенциальный диапазон её применения.

#### Список использованных источников

1. Григорьев С.Н. Развитие отечественного станкостроения - фундамент модернизации машиностроительного производства// Автоматизация в промышленности. 2012. №5. С.4-7.
2. Мартинов Г.М., Любимов А.Б., Бондаренко

А.И., Сорокоумов А.Е., Ковалёв И.А. Подход к построению мультипротокольной системы ЧПУ// Автоматизация в промышленности. 2012. №5. С.8-11.

3. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Практические аспекты реализации сплайн-контуров в системах ЧПУ класса PCNC// Информационные технологии в проектировании и производстве. 2012. №3. С. 58-62.

4. Григорьев С.Н., Мартинов Г.М. Концепция построения базовой системы числового программного управления мехатронными объектами// Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. №2.

5. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Архитектура цифровых следящих приводов подач технологических машин// Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №10.

6. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. - Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами// СТИН. 2010. №7.

7. Мартинова Л.И., Пушков Р.Л., Козак Н.В., Трофимов Е.С. Решение задач синхронизации и точного позиционирования осей в системе ЧПУ// Автоматизация в промышленности, 2011. №05.

8. Мартинов Г.М. Современные тенденции раз-

вития компьютерных систем управления технологического оборудования// Вестник МГТУ "Станкин". 2010. №1.

9. Григорьев С.Н., Андреев А.Г., Мартинов Г.М. Перспективы развития кроссплатформенных компьютерных систем числового программного управления высокотехнологичного оборудования// Автоматизация в промышленности, 2011. №5, с. 3-8.

10. Григорьев С.Н. Научно-технические проблемы построения современных технологических систем с числовым программным управлением// Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 4. С. 19-26.

11. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Соколов С.В. Способ построения инструментария систем мониторинга и настройки параметров мехатронного технологического оборудования на основе специализированных программных средств// Мехатроника, автоматизация, управление. 2012, №7. С.45-50.

12. Мартинова Л.И., Мартинов Г.М. Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации// Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №11. С. 50-55.

МГТУ «СТАНКИН»

УДК 517.954

## ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УПРАВЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О ПЕРЕВОДЕ СИСТЕМЫ СТРУН ИЗ СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ В ЗАДАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ю.А.Гнилицкая

*В классе гладких функций указан метод нахождения граничных управляющих воздействий в задаче перевода упругой системы из начального состояния покоя в заданное финальное состояние. Главный результат представлен в виде готовых формул, определяющих искомые граничные управления как функции времени.*

**Введение.** В задачах управления колебаниями сетеподобных конструкций (колебания линейного фрагмента описываются классическим волновым уравнением, в каждом узле сетки заданы условия связи), как правило, преследуются две цели: 1) погасить нежелательные колебания и неустойчивости, 2) генерировать колебания заданных частот. Управляющие воздействия на объект прикладываются либо во всех узлах конструкции, либо только на границе конструкции, т.е. в граничных узлах сети [1].

В настоящей работе обосновывается существование граничных управляющих воздействий и представлен метод нахождения их в модельной задаче управления колебаниями упругой системы из  $m$  струн, закрепленных по типу графа-звезды, состоящей в переводе покоящейся

системы в заданное состояние – частный случай задачи перевода дифференциальной системы из заданного начального состояния в заданное финальное состояние [2]. Для упрощения полученных формул длины ребер графа кратны  $\pi$ , волновое уравнение используется в простейшей форме:  $u_n = u_{xx}$ . Главный результат исследования представлен в виде готовых формул, определяющих искомые граничные управления как функции времени.

**Основные понятия.** Пусть  $\Gamma$  – граф-звезда, состоящий из  $m$  одинаковых ребер  $\gamma_k$  и одного внутреннего узла  $\xi$ .

При этом ребра  $\gamma_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) параметризованы отрезком  $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$  (ориентация на ребрах «к узлу  $\xi$ »), ребро  $\gamma_m$  – отрезком  $\left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$  (ориентация на ребре – «от узла  $\xi$ »).

Обозначим через  $C(\Gamma)$  множество непрерывных на  $\Gamma$  функций,  $S(\Gamma)$  – множество кусочно-непрерывных функций,  $S^2(\Gamma)$  – множество функций, все производные которых до второго