

## Система управления приводом антенны локатора поиска и сопровождения

А. В. Шевченко, Р. В. Кожин, М. П. Василевский, Д. М. Ваврив

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4  
E-mail: shev@radar.kharkov.com

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2003 г.

Приведены результаты разработки микропроцессорной системы управления приводами полноповоротной антенны, которая использовалась при модернизации привода установки "Шилка". Система управления разработана на основе цифрового сигнального процессора ADSP-2189 фирмы Analog Devices и программируемой логики EP1K30-ACEX фирмы Altera. Описаны алгоритм управления, особенности взаимодействия цифровых и аналоговых подсистем привода антенны, а также предпринятые меры по обеспечению высокой надежности и помехозащищенности каналов управления.

Наводяться результати розробки мікропроцесорної системи керування приводами повноповоротної антени, яка використовувалася в модернізації установки "Шилка". Система керування розроблена на основі цифрового сигнального процесора ADSP-2189 фірми Analog Devices і програмованої логіки EP1K30-ACEX фірми Altera. Описані алгоритм керування, особливості взаємодії цифрової та аналогової підсистем привода антени, а також заходи, вжиті для забезпечення високої надійності та перешкодозахищеності каналів керування.

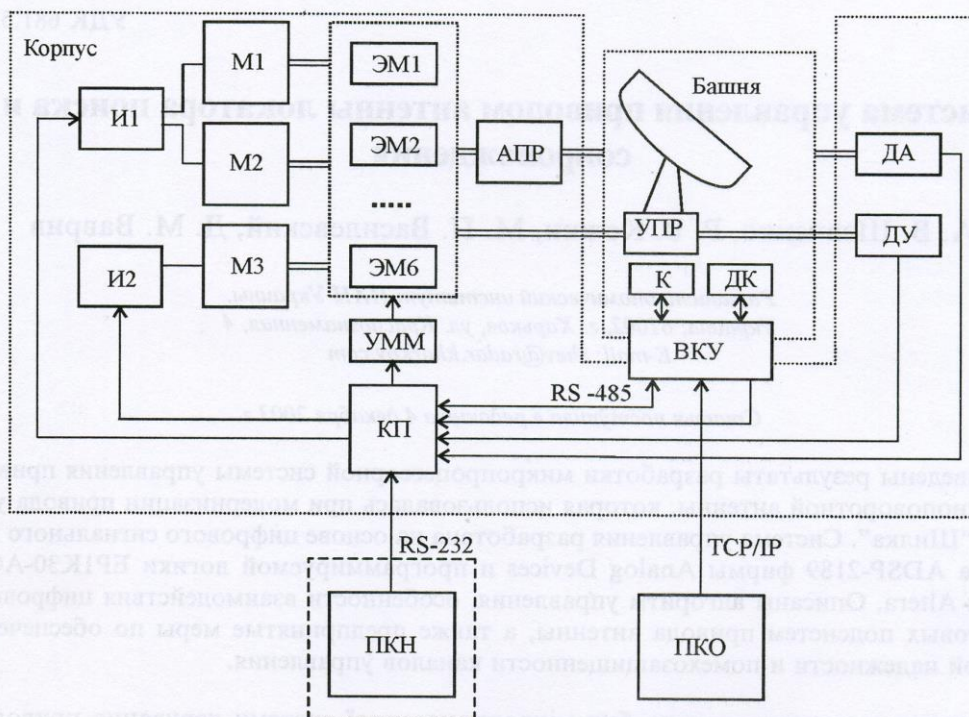
### 1. Введение

Применение современных микропроцессоров позволяет существенным образом повысить эффективность различных видов радиолокационных систем, увеличить их надежность, расширить функциональные возможности, а также сделать более удобным использование радиолокационной информации. Внедрение микропроцессоров привело к существенному пересмотру структуры построения локаторов, а также их отдельных функциональных блоков. В настоящей работе описаны результаты модернизации привода антенны установки "Шилка" путем внедрения микропроцессорной системы управления приводами. В результате внедрения этой разработки реализована полноповоротная антенная система с высокими динамическими и точност-

ными характеристиками. Такая система может быть использована при создании высокоэффективных локаторов поиска и сопровождения, а также других подобных устройств.

### 2. Устройство привода антенны

Структурная схема привода показана на рис. 1. Для перемещения антенны в азимутальной и угломестной плоскостях используются три асинхронных двигателя ДАК8, работающие от 3-фазного напряжения 220 В (частота 400 Гц). При модернизации механическая часть привода была доработана так, что два двигателя используются для перемещения антенны в азимутальной плоскости, а один – в угломестной. Предусмотрена возможность питания двигателей от однофазной сети (220 В, 50 Гц), для чего



**Рис. 1.** Структурная схема привода:

*М1, М2, М3 – асинхронные 3-фазные двигатели ДАК8 – 300/400 -3;*

*И1 – инвертор OMRON 3G3MV 4 кВт;*

*И2 – инвертор OMRON 3G3MV 2.2 кВт;*

*ЭМ1...ЭМ6 – муфты магнитопорошковые БПМ-20;*

*АПР, УПР – редукторы азимутального и угломестного привода антенны;*

*К – компьютер Pentium III - 800 МГц;*

*УММ – усилитель мощности для управления магнитопорошковыми муфтами;*

*ДА, ДУ – датчики положения антенны (оптический угловой датчик положения OMRON E6B2);*

*ДК – датчики минимального и максимального углов возвышения антенны в угломестной плоскости (концевые выключатели);*

*ВКУ – вращающееся контактное устройство;*

*КП – контроллер привода;*

*ПКО – персональный компьютер оператора локатора;*

*ПКН – персональный компьютер наладчика (подключается в режиме отладки, в рабочей системе отсутствует)*

используются два инвертора OMRON 3G3MV с мощностями 4 кВт и 2.2 кВт. Инверторы включаются по команде с контроллера привода и обеспечивают режим плавного старта двигателей. После разгона двигателей инвертор формирует сигнал готовности, анализируемый контроллером.

Управление моментом мощности, подаваемым на привод, осуществляется с помощью

магнитопорошковых муфт БПМ-20. Момент, передаваемый муфтой, прямо пропорционален току, протекающему через управляющую обмотку. Для формирования линейной зависимости момента мощности, который передается на редукторы азимутального и угломестного привода антенны от управляющего напряжения, формируемого контроллером привода, используется усилитель мощности

УММ. Усилитель производит стабилизацию тока через муфты за счет применения схемы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) постоянного напряжения 300 В. Величина тока определяется управляющим напряжением, которое создается гальванически развязанным цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в контроллере привода. Гальваническая развязка применена для исключения влияния помех, создаваемых сильноточными ключами в плате усилителей мощности, на цепи контроллера. В качестве датчиков положения антенны были использованы инкрементальные оптические датчики (кодеры) OMRON E6B2, разрешающая способность датчиков составляет  $0.045^\circ$ . Датчики установлены через редуктор с передаточным числом 60. Таким образом, точность определения разности координат антенны составляет  $0.045$  угловой минуты. Поскольку датчик делает 60 оборотов на один оборот антенны, для обеспечения начальной привязки координаты антенны к местности необходимо выделить один момент прохождения нуля-метки кодера из 60. Для этого введен дополнительный датчик, который представляет собой неподвижную оптопару – светодиод и фотодиод, разделенные непрозрачным диском, вращающимся синхронно с антенной и имеющим вырезанный сектор шириной  $6^\circ$ . Оптопара срабатывает в момент прохождения вырезанного сектора и установлена таким образом, что один из моментов прохождения нуля-метки кодера приходится на момент срабатывания.

Контроллер привода выполнен на основе цифрового сигнального процессора ADSP-2189 и микросхемы программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ) EP1K30-ACEX. В микросхеме ППВМ реализованы требуемые интерфейсы, алгоритмы обработки сигналов с датчиков положения антенны, средства программирования ЦАПа. Сигнальный процессор выполняет обработку команд с центрального компьютера и осуществляет управление приводом в соответствии с заданным законом. Связь контроллера с центральным компьютером локатора происходит по интерфейсу RS-485 через вращаю-

щееся контактное устройство. Одновременно может поддерживаться связь с другим компьютером по интерфейсу RS-232.

### 3. Контроллер привода антенны

Структурная схема контроллера привода показана на рис. 2. Контроллер привода и усилители мощности магнитопорошковых муфт размещены на двух платах размером  $110 \times 150$  мм, что позволило установить их на место, освободившееся после удаления старых индукционных датчиков положения антенны точного и грубого отсчета, без добавления дополнительных блоков.

Все входные и выходные сигналы контроллера проходят через микросхему ППВМ EP1K30-ACEX. В этой микросхеме реализованы следующие функциональные блоки, написанные на языке AHDL:

- асинхронный приемопередатчик интерфейса RS-232, работающий со скоростью 9600 бод, с буфером в 4 байта;
- приемопередатчик интерфейса RS-485;
- блок обработки сигналов с оптических инкрементальных датчиков положения антенны (выполняется подсчет импульсов с датчиков с учетом нуля-меток и вычисление текущей координаты антенны);
- блок записи требуемого значения в ЦАП AD7399 по протоколу последовательного периферийного интерфейса;
- блок ввода/вывода дискретных сигналов.

Следует указать, что такой же приемопередатчик интерфейса RS-485 выполнен в микросхеме ППВМ на плате обработки данных, входящей в состав центрального компьютера. Данные передаются в коде Манчестера 2. Передатчик автоматически генерирует, а приемник проверяет контрольную сумму передаваемого по интерфейсу пакета. Несущая частота равна 2 МГц. Пропускная способность интерфейса достигает значения, близкого к 60 кб/с.

Сигнальный процессор и микросхема ППВМ связаны шинами адреса и данных. Со стороны ЦСП функциональные блоки в микросхеме ППВМ видны как набор портов во внешнем адресном пространстве.

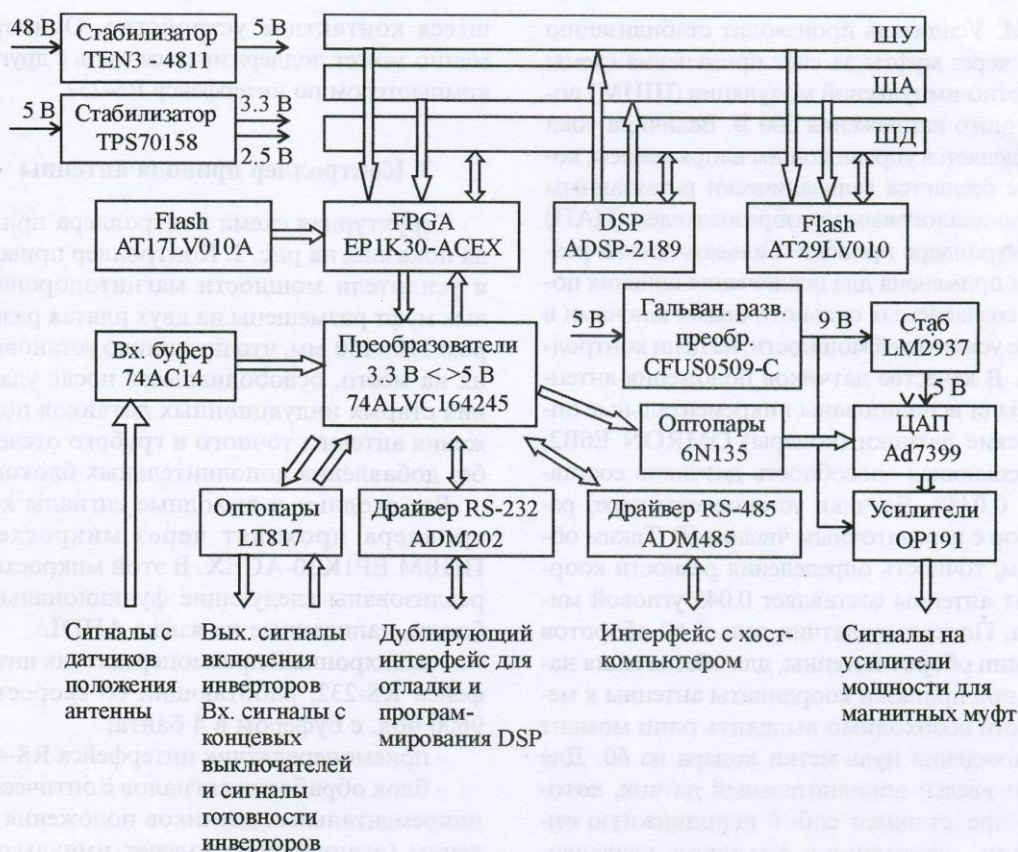


Рис. 2. Структурная схема контроллера привода

#### 4. Управление контроллером привода антенны

Связь между центральным компьютером, размещенным на вращающейся платформе, и компьютером оператора локатора происходит по протоколу TCP/IP (протокол управления передачей/протокол Интернет). Центральный компьютер выступает в качестве сервера. Компьютер оператора локатора – клиент. Связь выполняется через вращающееся контактное устройство. Для обеспечения устойчивой работы в условиях повышенной вибрации, связанной с большими ускорениями движения антенны, из состава центрального компьютера был исключен жесткий диск. При запуске сервера производится удаленная загрузка операционной системы, образ которой предостав-

ляется клиентом. После этого сервер создает в оперативной памяти виртуальный диск, в который по сети загружаются главная программа сервера и файл конфигурации.

Компьютер оператора задает режим работы привода и закон изменения координат. Центральный компьютер по интерфейсу RS-485 передает в контроллер требуемую координату и возвращает компьютеру оператора текущую координату и статус контроллера привода антенны.

Для использования антенны в составе комплекса радиолокационной станции поиска и сопровождения в центральном компьютере реализованы следующие режимы работы:

- позиционирование в точку с заданными координатами;
- сканирование в заданном секторе;

- круговой обзор;
- захват цели;
- сопровождение цели.

Был разработан и реализован алгоритм сглаживания траектории движения антенны, позволяющий ограничивать ускорение в пределах величин допустимых для привода. В режиме сопровождения осуществляется предсказание траектории движения цели при помощи фильтра Кальмана.

### 5. Алгоритм управления приводом антенны

Контроллер привода антенны обеспечивает следующие режимы работы:

- режим поиска нуль-меток датчиков положения антенны;
- режим движения по заданному закону;
- режим движения по рассогласованию.

После включения питания контроллер приводов переходит в режим поиска нуль-

метки датчиков для обеспечения привязки антенны к местности. В режиме поиска нуль-меток датчиков антенна движется с постоянной скоростью по одной из координат до момента прохождения нуль-метки датчика.

В режиме движения по заданному закону центральный компьютер передает в контроллер координаты требуемой точки, а контроллер перемещает антенну в эту точку. Угол рассогласования  $\Delta$  определяется как разность между задаваемой координатой  $x$  и текущей координатой антенны  $y$ . Структурная схема системы управления антенной в режиме движения по заданному закону приведена на рис. 3, а.

При сопровождении цели обратная связь по положению в приводе размыкается, а в качестве задающего воздействия подается рассогласование  $\Delta$  между линией визирования антенны и направлением на цель, которое определяется в приемнике по дискриминационной характеристике диаграммы направленности антенны (см. рис. 3, б).

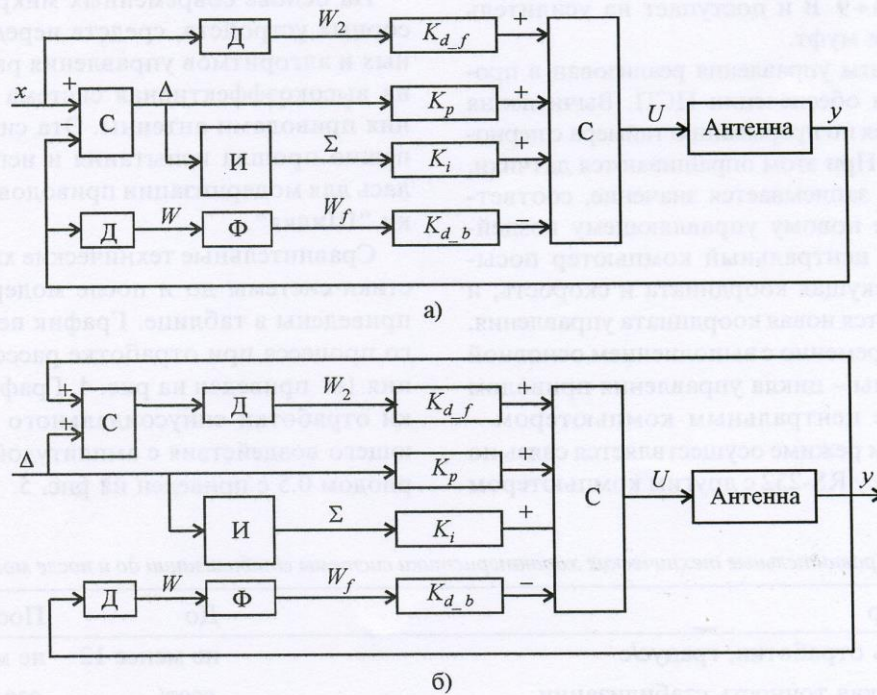


Рис. 3. Структурная схема системы управления приводом:  
 С – сумматор; Д – дифференцирующее звено; И – интегрирующее звено; Ф – фильтрующее звено

Регулятор имеет четыре параметра, значения которых определяются в процессе настройки привода:  $K_p$  – коэффициент пропорциональности;  $K_i$  – коэффициент интегральный;  $K_{d_f}$  – коэффициент упреждения по скорости;  $K_{d_b}$  – коэффициент обратной связи по скорости.

Скорость движения по координате  $W$  и производная от управляющего сигнала  $W_2$  определяются дифференцирующим звеном Д (см. рис. 3).

Для устранения “шума”, возникающего при вычислении скорости вследствие дискретности датчика положения, в обратную связь в контуре скорости введен цифровой фильтр низких частот Ф. Скорость движения антенны после фильтра равна  $W_f$ , частота среза фильтра – 20 Гц.

Операция интегрирования в интегрирующем звене И заменяется суммированием методом прямоугольников.  $\Sigma$  – сигнал с выхода интегратора.

Сигнал  $U$  с выхода регулятора преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал напряжением  $0 \div 9$  В и поступает на усилитель мощности муфт.

Алгоритм управления реализован в программном обеспечении ЦСП. Вычисления проводятся по прерыванию таймера с периодом 1 мс. При этом опрашиваются датчики, и в ЦАП записывается значение, соответствующее новому управляющему воздействию. В центральный компьютер посылаются текущая координата и скорость, и принимается новая координата управления.

Одновременно с выполнением основной программы – цикла управления приводом и связи с центральным компьютером – в фоновом режиме осуществляется связь по интерфейсу RS-232 с другим компьютером

(если он подключен). Эта возможность очень удобна для отладки системы.

При отладке системы доступны следующие функции по управлению и контролю:

- включение и контроль функционирования двигателей;
- установка коэффициентов регуляторов по обеим координатам по положению и по скорости;
- включение контроллера в режиме поиска нуль-меток по обеим координатам;
- включение контроллера в режиме стабилизации по скорости;
- включение контроллера в режиме стабилизации по положению;
- отображение текущей скорости и координаты по обеим плоскостям стабилизации;
- отображение аварийных режимов;
- отображение состояния концевых переключателей.

## 6. Заключение

На основе современных микропроцессорных устройств, средств передачи данных и алгоритмов управления разработана высокоэффективная система управления приводами антенны. Эта система успешно прошла испытания и использовалась для модернизации приводов установки “Шилка”.

Сравнительные технические характеристики системы до и после модернизации приведены в таблице. График переходного процесса при отработке рассогласования  $18^\circ$  приведен на рис. 4. График ошибки отработки синусоидального управляющего воздействия с амплитудой  $7^\circ$  и периодом 0.5 с приведен на рис. 5.

**Таблица.** Сравнительные технические характеристики системы стабилизации до и после модернизации

Параметр	До	После
Скорость отработки, градус/с	не менее 12	не менее 80
Статическая точность стабилизации	$0^\circ 02'$	$0^\circ 01'$
Динамическая точность стабилизации при синусоидальном изменении углов с амплитудой $7^\circ$ и периодом 0.5 с	$0^\circ 14'$	$0^\circ 10'$

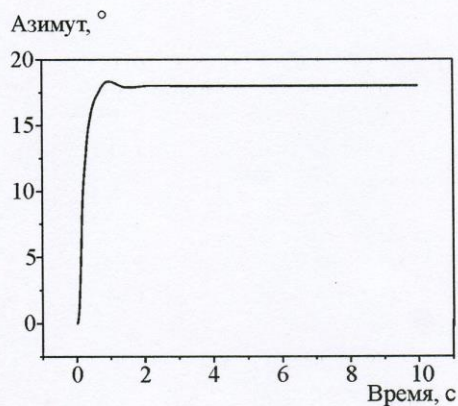


Рис. 4. Переходной процесс.

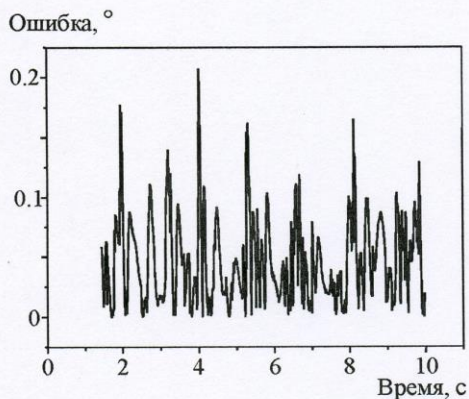


Рис. 5. Ошибка обработки синусоидального управляющего воздействия с амплитудой и периодом 0.5 с

Применение стандартных интерфейсов RS-485 и кода Манчестер-2 с проверкой контрольной суммы обеспечивает высокую надежность канала связи и позволяет легко встраивать данную систему в локационный комплекс.

## Литература

1. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А. А. Красовского. Москва, Наука, 1987 г.
2. В. А. Бесекинский, В. В. Изранцев. Системы автоматического управления с МикроЭВМ. Москва, Наука, 1987 г.
3. П. Н. Бибило. Основы языка VHDL. Москва, Солон-Р, 2002 г.
4. ADSP-2100 Family User's Manual. Analog Devices Inc. Norwood 1995.

## Search and Track Radar Antenna Drive Control System

A. V. Shevchenko, R. V. Kozhin,  
M. P. Vasilevsky, D. M. Vavriv

The design of a microprocessor-based control system for a rotary antenna drive, formerly used in improvement of the "Shilka" drive mechanism, is shown. The control system employs the Analog Devices' digital signal processor ADSP-2189 and the Altera's FPGA chip EP1K30-ACEX. The control algorithm, the character of interaction between the antenna drive digital and analog subsystems, as well as the measures to provide better performance reliability and noise-immunity of communication channels, are described.

Литература

1. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А. А. Кривоноскова. Москва, Наука, 1987 г.  
 2. В. А. Бокорский, В. В. Наринко. Справочник автоматического управления с микроСЭМ. Москва, Наука, 1987 г.  
 3. И. Н. Бугиню. Основы языка VHDL. Москва, Спутник-Р, 2002 г.  
 4. ADSP-2100 Family User's Manual. Analog Devices Inc. Norwood 1992.

Search and Track Radar Antenna Drive Control System

A. V. Shevchenko, R. V. Kozhin,  
 M. P. Vasilievsky, D. M. Yarin

The design of a microprocessor-based control system for a rotary antenna drive, formerly used in improvement of the "Shilka" drive mechanism, is shown. The control system employs the Analog Devices' digital signal processor ADSP-2189 and the Altera's FPGA chip EP1K10-ACEX. The control algorithm, the character of interaction between the antenna drive digital and analog subsystems, as well as the measures to provide better performance, reliability and noise-immunity of communication channels, are described.

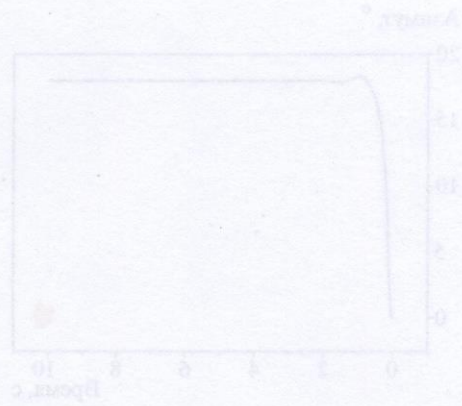


Fig. 4. Frequency response

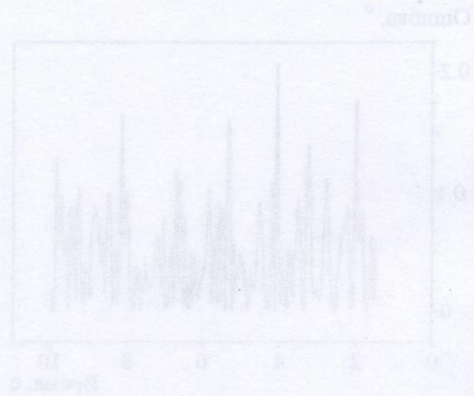


Fig. 5. Output oscillation transfer function for constant input with amplitude 0.1 and phase 0.7 c

Тангенсные стандартных интерфейсов XE-485 и код-матрицы-2 с помощью цифровой суммирующей выработки выработка канала с шумом и позволяет легко реализовать данную систему в координатном пространстве.