© Ю.П. Страшун, 2006

УДК 621.382

Ю.П. Страшун

ВСТРАИВАЕМЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ПЛАТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Семинар № 13

В настоящее время платы микроконтроллеров (ПМК) обычно проектируются на базе однокристальных микроконтроллеров (ОМК), выпускаемых рядом фирм-изготовителей электронных компонентов. В функциональном отношении ПМК в отличие от ОМК содержат стандартные, высоковольтные, мощные узлы гальванической развязки, специализированные источники электропитания, малогабаритные узлы индикации, а также разъемы для обеспечения внешних связей.

Особую категорию составляют ОМК, ориентированные на качественный ввод/вывод аналоговых сигналов для целей измерения и регулирования.

В работе [1] содержится оценка технических возможностей аналогового интерфейса ОМК ряда фирм-изготовителей с указанием перечня технических характеристик, по которым он специфицируется (см. таблицу).

Наиболее распространенными источниками сигналов в системах автоматизации и управления являются датчики температуры, давления, уровня, расхода. Широко применяются датчики с унифицированным токовым (4–20 мА) или потенциальным (0–5 В, 0–10 В) выходом. При использовании датчиков с непосредственным выходом (например, термоэлектрических и терморезистивных) необходимо наличие встроенного в ОМК измерительного усилителя с программируемым коэффициентом усиления (PGA). В наиболее совершенных моделях коэффициент усиления находится в диапазоне от 1 до 128, в более простых – от 0,5 до 16. При этом требуемая погрешность измерительного канала не должна превышать 0,5 %.

В ряде моделей ОМК имеется встроенный температурный датчик.

ОМК, выпускаемые фирмами, которые известны в области производства аналоговых и аналого-цифровых компонентов, Analog Devices и Texas Instruments, оснащены помехозащищенными и низкоскоростными (скорость преобразования до 1,3 кГц) или быстродействующими (скорость преобразования 100 кГц и выше) АЦП с разрядностью до 24 бит, расчитанными на измерение сигнала как среднего (порядка 1 В), так и низкого уровня (порядка 10 мВ). Микроконтроллеры фирмы CIP имеют АЦП, работающий со скоростью до 500 000 отсчетов в секунду при входных сигналах порядка 100 мВ.

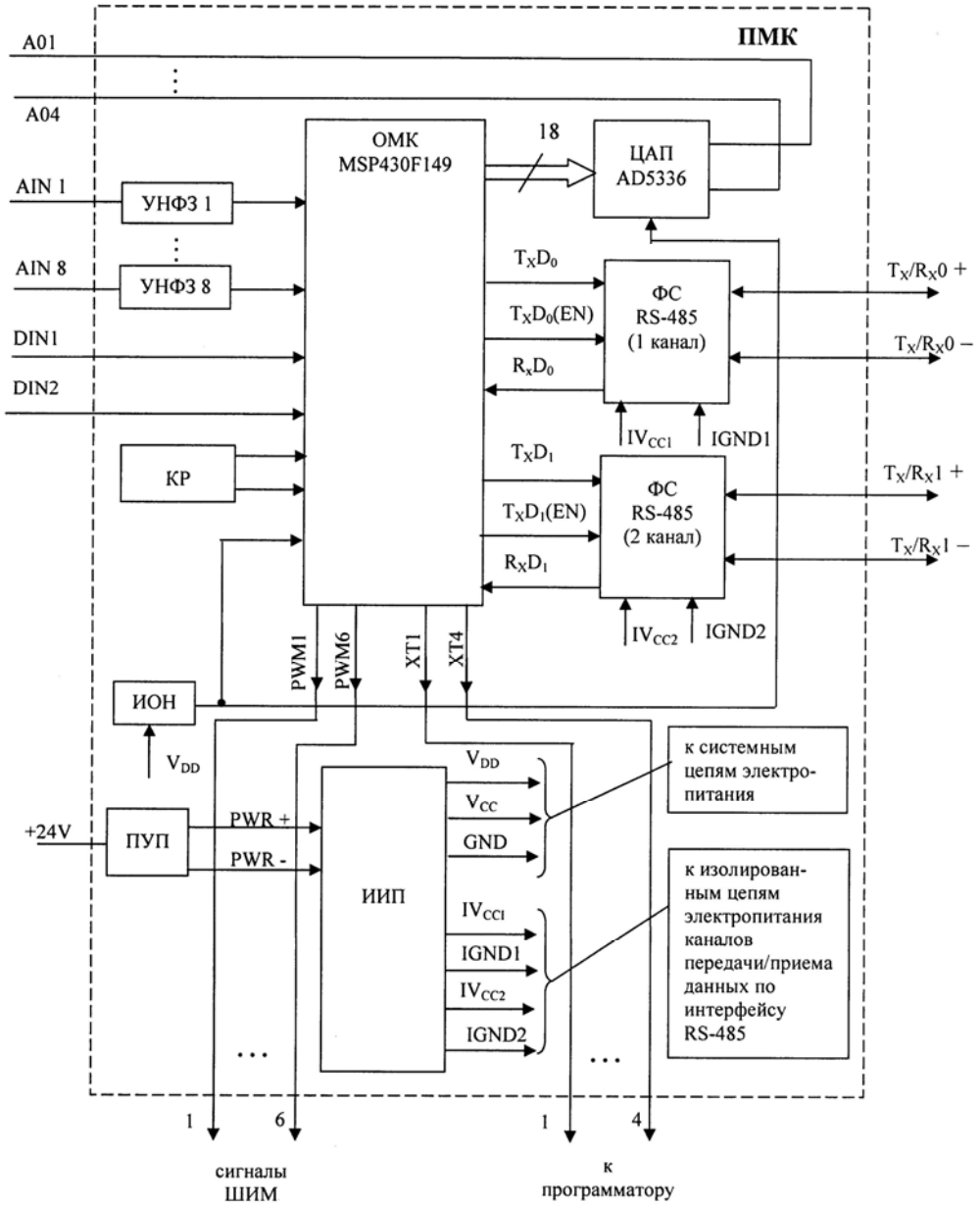
Некоторые ОМК оснащены блоками автокалибровки и детекторами обрыва связи с датчиками, осуществляющими программный контроль целостности линии связи с датчиком.

Для непосредственного управления исполнительными устройствами желательно наличие аналогового

Аналоговый интерфейс ОМК

Тип ОМК, фирма-изготовитель / Основные технические х-ки	AVR AT mega 64 Фирма Atmel	C8051F020 Фирма Cygnal Integrated Products	LPC2114 Фирма Philips	PIC18 F8620 Фирма Microchip	Neuron Chip CY7C53120 Cypress Semiconductor. Corp.	MSP430F169	MSC1210Y5	MSC1211Y5	ADuC7000 ARM7	8052 microconverters
						Фирма TEXAS INSTRUMENTS			Фирма ANALOG DEVICES	
Количество каналов аналогового ввода	8	8	4	до 16	Встроенного в чип аналогового интерфейса нет. Его функции обеспечиваются через I/O companion chip	8	8	8	5-16	8
Скоростной ввод аналоговых сигналов (АЦП поразрядного уравновешивания, разрядность/частота преобразования)	10/100 кГц	10/100 кГц[1]	10/400 кГц	10/100 кГц		12/200 кГц			12/1 МГц	12/ до 420 кГц 16-24/105 кГц
Медленный ввод аналоговых сигналов (сигма – дельта АЦП, разрядность/частота преобразования)	нет	нет	нет	нет		нет	16 - 24/1 кГц	16 – 24/1 кГц	нет	16-24/1,3 кГц
Диапазон коэффициентов усиления PGA	10, 200 (для дифференциальных измерений)	0,5-16	нет	нет		нет	1-128	1-128	нет	1-128 для 1,3 кГц и для 105 кГц
Количество каналов аналогового вывода с ЦАП: по напряжению по току разрядность ЦАП, бит	нет нет	2 нет 12	нет нет	нет нет		2 нет 12	нет нет	2 2 16	до 4 нет 12	1 или 2 нет 12
Наличие внутреннего источника опорного напряжения	есть	есть	есть	есть		есть	есть	есть	есть	есть
Наличие встроенного температурного датчика	нет	есть	нет	нет		есть	есть	есть	есть	есть
Наличие аналогового компаратора, шт.	1	2	нет	2		есть	нет	нет	есть	нет
наличие детектора обрыва измерительных цепей (BOD)	нет	есть				нет	есть	есть	нет	есть
Наличие программируемого многоуровнего детектора сигналов низкого уровня (LVD)	есть		нет	есть (с поддержкой прерывания при определении низкого напряжения)			есть	есть		есть
Программируемый сброс при выключении (PBOR)	есть	есть	нет	есть		есть	есть	есть	нет	нет

[1] В других моделях 12/100 кГц и 8/500 кГц



Структурная схема ПМК на базе ОМК MSP430F149: УНФЗ – узел нормализации, фильтрации и защиты; КР – кварцевый резонатор; ФС – формирователь сигналов; ИОП – источник опорного напряжения; ПУП – преобразователь уровня питания; ИИП – источник изолированного питания; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; AIN – аналоговый ввод; AO – аналоговый вывод; DIN – дискретный ввод

вывода по току. Такой вывод имеется у микроконтроллеров TI типа MSC1200 /MSC1211/MSC1212.

В ОАО «ИНЭУМ» разработаны аналоговые ПМК для систем автоматизации и управления широкого применения и, в частности, для подстанций электроснабжения Московского метрополитена.

Одна из плат непосредственно встраивается в блок реле и выполнена на базе ОМК с функцией аналогового ввода и с сверхмалым потреблением мощности MSP 430 F 149 фирмы Texas Instruments [2, 3]. В ОМК используется 16-ти разрядный RISC-процессор и архитектура «system-on-chip» («система на кристалле»). ОМК включает в себя 8-ми канальный 12-ти разрядный АЦП с частотой преобразования 200 кГц. Для расширения области применения рассматриваемой платы, в частности возможности сопряжения с частотно-управляемым и другими приводами, наряду с аналоговым выводом по напряжению необходим аналоговый вывод по току. Однако ОМК аналогового ввода/вывода MSP 430 F 169 той же фирмы с архитектурой «signal-chain-on-chip» («цепочка сигналов на кристалле») имеет аналоговый вывод только по напряжению (два 12-ти разрядных ЦАП). Поэтому на ПМК к ОМК MSP 430 F 149 подключен отдельный 4-х канальный цифро-анало-говый преобразователь AD 5336 фирмы Analog Devices с выходным каскадом программируемого источ-ника тока. Упомянутый ЦАП также обеспечивает выход по напряжению в диапазонах 0–5 В (±5 В).

Структурная схема рассматриваемой ПМК приведена на рисунке.

ОМК имеет производительность до 8 MIPS, объем FLASH-памяти порядка 60 кб, ОЗУ данных – 2 кб. На ПМК предусмотрены 2 изолированных канала RS-485 и 6 каналов выдачи сигналов ШИМ.

Другая ПМК представлена модулем аналогового ввода в стандарте фирмы OCTAGON SYSTEMS. Техническое решение основано на применении ОМК MSC 1211 [2, 3]. Последний обладает высокой помехозащищенностью, точностью и малым временным и температурным дрейфом напряжения на выходе источника опорного напряжения. Процессор, используемый в ОМК, - 8051 – совместимый, имеет производительность до 15 MIPS, FLASH ЗУ – до 32 кб, ОЗУ – 1,28 кб, на кристалле 2 порта приемо-передатчика USART. АЦП в ОМК - 24-х разрядный без пропуска кодов, при этом эффективная разрешающая способность равна 22 разрядам, скорость преобразования 1 кГц. Количество входных дифференциальных/однопроводных каналов – 8.

ОМК содержит четыре 16-ти разрядных ЦАП, при этом возможны следующие комбинации (4 выхода по напряжению; 2 выхода по напряжению и 2 выхода по току).

В спецификации на ЦАП ОМК [4] имеется информация, что максимальная величина интегральной нелинейности (INL) не превышает ±0,146 %, максимальная ошибка выходного напряжения при нулевом коде не более ±35 мВ, а ошибка коэффициента усиления - ±1,25 % от полной шкалы.

Экспериментальные исследования ПМК с каналами аналогового вывода по току в диапазоне 0–20 (4–20) мА при величине резистора R_{DAC} = 410 Ом и сопротивлении нагрузки R_H = 160 Ом показало, что максимальная ошибка выходного тока при нулевом коде не превышает 0,06 мА, а при кодах, соответствующих промежуточным значениям кодов диапазона 4 – 20 мА, не более 0,09 мА. Последняя цифра свидетельствует о том, что рассматриваемая ПМК на базе ОМК MSC 1211 может обеспечить ве-

личину основной приведенной погрешности канала аналогового вывода по току не более 0,5 % при указанных выше значениях R_{DAC} и R_H.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Страшун Ю.П., Заварзин В.В.* Однокристальные микроконтроллеры в аппаратно-программных средствах автоматизации и управления массового применения. Электронные компоненты №7, 2004г.;
2. *Data* converter selection Guide. Texas Instruments, каталог 2Q 2003;
3. *Signal* acquisition, processing and control for industrial applications. Texas Instruments, каталог 4Q 2003;
4. *Anderson R., Gurevich M.* MSC 1211/1212 DAC INL improvement. Application report фирмы Texas Instruments SBAA 112-March 2004.

Коротко об авторах

Страшун Ю.П. – кандидат технических наук, начальник лаборатории ОАО «ИНЭУМ» Институт электронных управляющих машин.

РУКОПИСИ, *ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

1. *Ткаченко П.В.* Экспериментальные исследования электродинамического торможения асинхронного двигателя с электролитическим конденсатором в цепи выпрямлееной тока ротора (470/07-06 — 18.04.06) 7 с.
2. *Михайлов Ю.В.* Организация защиты инновации в производстве (471/07-06 — 18.04.06) 3 с.
3. *Каминский Д.С., Шульгин В.А.* Переналаживаемость в экспериментальном производстве металлургической отрасли (472/07-06 — 18.04.06) 3 с.
4. *Колесников В.Н.* Анализ ремонтного обеспечения, как элемента системного состояния (473/07-06 — 18.04.06) 5 с.
5. *Кармановская Н.В., Шульгин В.А.* Организационно-экономические принципы обеспечения экономического равновесия (474/07-06 — 18.04.06) 4 с.

© Н.Г. Махмутов, 2006

УДК 621.382

Н.Г. Махмутов

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЛЕРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗДАНИЙ

Системы автоматизации и управления зданиями (САиУЗ) являются частным случаем автоматизированных систем контроля и управления (АСКиУ), а, следовательно, задачи, основные характеристики и особенности АСКиУ и САиУЗ во многом совпадают.

Так, в состав САиУЗ входят следующие аппаратные средства:

– источники данных об объекте – датчики;

– линии передачи информации;

– средства обработки информации, принятия решений и формирования сигналов контроля, индикации, управления – цифровые контроллеры;

– исполнительные механизмы, устройства индикации и контроля.

Задачи САиУЗ:

– оперативно принимать решение при аварийных и нештатных ситуациях (пожаре, затоплении, утечках воды, газа, несанкционированном доступе в охраняемые помещения);

– обеспечить своевременную локализацию аварийных ситуаций;

– получать объективную информацию о состоянии всех систем здания и их работе;

– обеспечить централизованный контроль и управление при нештатных ситуациях;

– вести оптимальный режим управления инженерным оборудованием с целью сокращения затрат на использование энергоресурсов, потребляемых зданием (горячей и холодной воды, тепла, электроэнергии, воздуха и т.д.);

– вести объективный анализ работы оборудования, действий инженерных служб и подразделений охраны при нештатных ситуациях за счет документирования принятых решений на основе автоматизированных баз данных.

Цифровые контроллеры в архитектуре систем автоматизации и управления зданиями (САиУЗ) занимают место между нижним уровнем датчиков и исполнительных механизмов (полевой уровень) и системами верхнего уровня управления (уровнем менеджмента). На рис. 1 представлена типовая схема многоуровневой сетевой инфраструктуры САиУЗ. Основные функции контроллеров в системе – это сбор, обработка и передача на верхний уровень первичной информации, а также генерация и передача управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

Для управления САиУЗ применяется ряд моделей контроллеров. Цифровые контроллеры могут быть следующих типов:

– специализированные прикладные контроллеры (СПК) – узкоспециализированные миниатюрные контроллеры с фиксированными функциями;

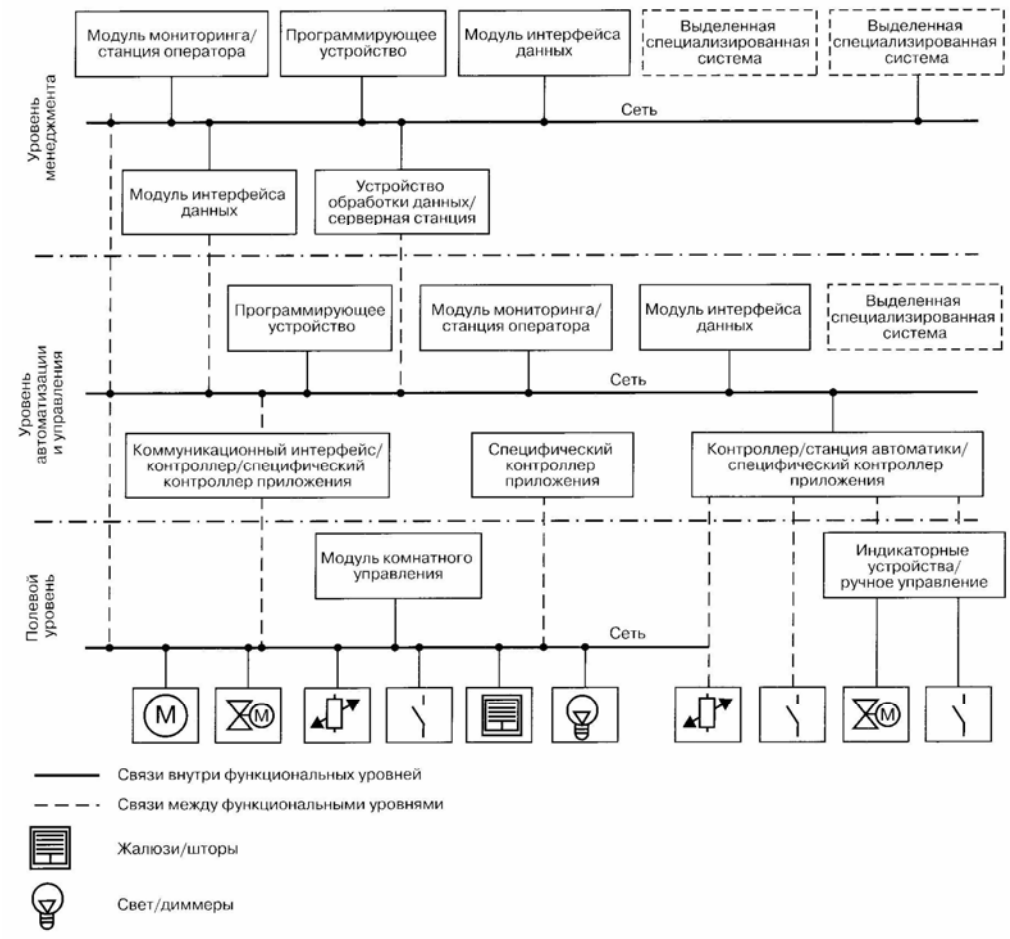


Рис. 1. Многоуровневая сетевая САиУЗ

– конфигурируемые контроллеры – контроллеры с перестраиваемыми стратегиями управления;

– программируемые контроллеры – с программируемыми стратегиями управления.

Характеристики этих типов контроллеров приведены в таблице.

Цифровые контроллеры могут нести основную нагрузку по управлению процессом, выдавая на верхний уровень запрашиваемую информацию, а могут быть лишь передаточным звеном между компьютером и конкретными элементами управления технологическими процессами.

В мире автоматизации программируемые цифровые контроллеры находят применение в подсистемах распределенных систем управления (РСУ), и в, частности, в DCS (Distributed Control System), RCS (Remote Control System) и т.п.

Цифровыми контроллерами, например, являются:

– программируемые логические контроллеры – ПЛК согласно стандарту IEC 61131-1-92;

Таблица 1

Типы контроллеров	Способ задания алгоритма	Аппаратное обеспечение	Сетевые возможности	Возможность масштабирования
Программируемые	Программирование стандартными и специальными средствами	Микропроцессорное с открытой или жесткой архитектурой	Один или несколько сетевых интерфейсов	Широкие возможности
Конфигурируемые	Параметрический или выбирается из библиотеки конфигураций	Микропроцессорное с жесткой архитектурой	Обычно один интерфейс	Небольшие
Специализированные прикладные	Предопределён производителем	Аналоговое, цифровое или простое микропроцессорное	Обычно нет	Нет

– промышленные PC-совместимые контроллеры и т.д.

Программируемые PC-совместимые контроллеры предоставляют выбор между программированием на языке высоко уровня или использованием стандартных средств разработки программного обеспечения (ПО). Программирование контроллера подразумевает создание в его памяти алгоритма функционирования контролируемой и управляемой технологической системы или ее части. Оно часто осуществляется посредством языков программирования IEC 61131-3. Поэтому контроллер должен обладать достаточными аппаратными средствами, позволяющими инсталлировать ядро операционной системы, обеспечивающей поддержку средств разработки и выполнения пользовательского приложения на базе языков IEC 61131-3. Стоимость проекта, реалии-зуемого на базе такого контроллера и средства разработки пользовательского приложения, зачастую бывает высока. Это объясняется в основном тем, что к производительности аппаратных средств предъявляются высокие требования, а именно: процессор, способный поддерживать работу ядра операционной системы (как правило, 32 бит), большой объем памяти для хранения ядра средства разработки и пользовательского приложения (1 Мбайт и более). Благодаря выполнению таких требований пользователь контроллера обладает свободой задания поведенческой и функциональной моделей системы управления. Средства разработки согласно стандарту IEC 61131-3 позволяют задавать статические и динамические характеристики системы управления (функциональную и поведенческую модель).

Однако, как первичная настройка САиУЗ, включающей такой контроллер, так и ее дальнейшее обслуживание может производиться лишь специалистом, обладающим высокой квалификацией в области программирования и отладки, а, следовательно, сопряжены с весьма высокими затратами. Это объясняется сложностью и многогранностью задач, решаемых контроллером.

СПК – это, как правило, контроллеры с жестко заданным (производителем) алгоритмом работы или библиотекой алгоритмов для применения в ряде типовых технологических процессов. Это значит, что алгоритм работы таких контроллеров неизменен – строго определен набор функциональных блоков, заданы связи между ними и режимы рабо-

ты устройства управления. Пользователь может лишь подстраивать работу такого контроллера под имеющийся технологический процесс путем задания некоторых параметров, например: уставок, условий перехода с режима на режим, временных задержек, поро-гов срабатывания сигнализации и др. В отличие от ПЛК, к производительности СПК не предъявляются высокие требования, поскольку они не должны поддерживать функции операционной системы. Это позволяет успешно решать задачи управления технологическими процессами в реальном времени при невысоких затратах.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, в отличие от пользователей ПЛК, пользователи СПК сильно ограничены в возможности применения таких устройств для решения задач, не предусмотренных производителем. Кроме того, при изменении требований к процессу управления во время эксплуатации технологического контроллера с жестко заданным алгоритмом, возникнет несоответствие между алгоритмом управления и алгоритмом, заданным производителем контроллера, и пользователь окажется перед неразрешимой задачей изменения алгоритма работы контроллера.

Компромиссным направлением, позволяющим пользователю задавать алгоритм работы системы управления в рамках имеющейся аппаратной части и не вдаваться при этом в тонкости программирования, являются конфигурируемые контроллеры. Задача создания таких контроллеров и средств их разработки представляются чрезвычайно актуальной.

Задачи автоматизации и управления зданиями требуют от контроллеров обеспечения работы в различных режимах, то есть для каждого режима работы системы контроллеру задаются выполняемые функции.

Формально контроллер, служащий для решения задач управления технологическими процессами, характеризующимися различными состояниями, по существу является контроллером конечных состояний.

Средства разработки пользовательского приложения и программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) конфигурируемых контроллеров должны решать следующие задачи:

– задание функциональной модели системы – параметров и связей между имеющимися функциональными блоками;

– задание поведенческой модели системы, отражающей функционирование системы во времени.

Функциональная модель системы описывает связи и параметры функциональных модулей (регуляторов, коммутаторов, фильтров и др.). Данная модель может быть достаточно просто описана в текстовой форме или наглядно представлена в виде диаграммы функциональных блоков (Function Block Diagram). Соответственно, гибкость функциональной модели контроллера определяется возможностью задавать характеристики функциональных блоков и связи между ними.

Поведенческая (динамическая) модель, как правило, описывается при помощи конечных автоматов или сетей Петри.

Сети Петри работают в терминах условий и событий. Условиям сопоставлены позиции (особые узлы – емкости для хранения фишек связаны ориентированными дугами с переходами), а событиям – переходы (особые

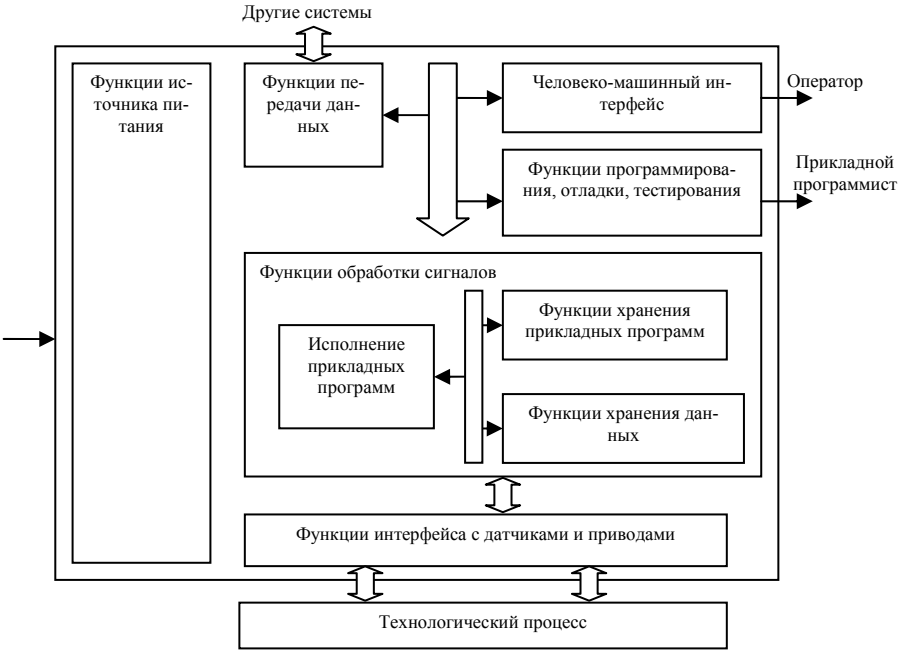


Рис. 2. Функциональная схема конфигурируемого контроллера

узлы-действия, перемещающие фишки и связанные ориентированными дугами с позициями). Конечные автоматы являются частным случаем сетей Петри и эквивалентны автоматным сетям Петри – сетям, в которых каждый переход может иметь только одну входную и одну выходную позицию.

Сети Петри лучше всего подходят для описания асинхронных систем, тогда как конечные автоматы – для последовательных систем (автоматное программирование). Конечные автоматы обладают лучшей компактностью представления. Конечные автоматы гораздо проще анализировать, чем классические сети Петри. Подход к заданию поведенческой модели на основе теории конечных автоматов обладает наилучшим сочетанием наглядности и функциональности.

Конечный автомат определяет реакцию системы управления на получение событий извне. Такая реакция описывается с помощью переходов, каждый из которых указывает на событие, происходящее после наступления условия перехода из одного состояния в другое. Конечные автоматы позволяют описать поведенческую модель системы в упрощенной форме.

Основные понятия, служащие для описания конечного автомата – это состояние и переход.

Состояние, как правило, соответствует какому-либо режиму работы системы управления, а переход – это перевод системы из одного режима работы в другой.

Состояние – это ситуация в жизненном цикле объекта, во время которой он удовлетворяет некоему условию, выполняет определенную деятельность,

или ожидает какого-либо события. Каждое состояние характеризуется своим именем, а также действием, характерным для этого состояния.

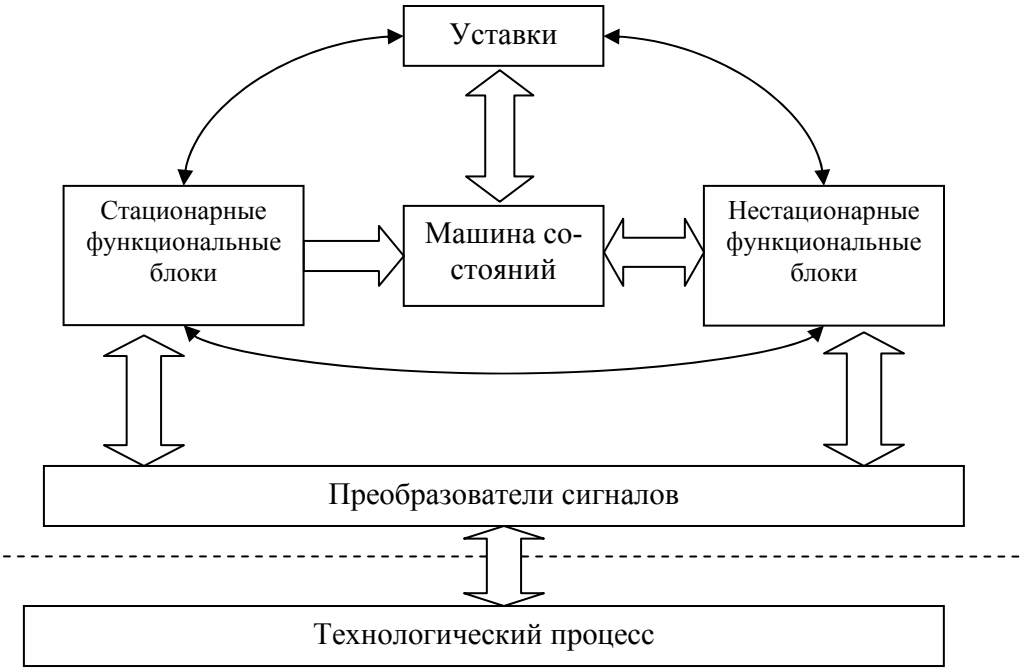


Рис. 3. Структурная схема программно-алгоритмического обеспечения контроллера

Переход – это отношение между двумя состояниями, показывающее, что объект, находящийся в первом состоянии, будет выполнять некоторые действия и перейдет в другое состояние, как только наступит некоторое событие (выполнение условий перехода).

В каждый момент времени автомат может находиться в одном и только в одном из своих состояний. Это означает, что формализм автомата предназначен для моделирования последовательного поведения, когда объект в течение своего жизненного цикла последовательно проходит через все свои состояния. При этом автомат может находиться в отдельном состоянии как угодно долго, если не происходит никаких событий.

Все сказанное выше относится к так называемой «классической» теории конечных автоматов. Применение такого подхода к описанию достаточно сложной системы управления бывает неудобно из-за большого количества состояний, в которых может находиться данная система, и всех возможных переходов между ними.

Для минимизации формального представления поведенческой модели сложной системы управления вводится ряд понятий, позволяющих группировать состояния и переходы. Для группировки нескольких состояний вводится так называемое составное состояние (composite state) – сложное состояние, которое состоит из других вложенных в него последовательных состояний. Вложенные состояния будут выступать по

отношению к составному как подсостояния (substate). При этом любое из подсостояний, в свою очередь, может являться составным состоянием и содержать внутри себя другие вложенные подсостояния.

Таким образом, если в общем случае автомат представляет динамические аспекты моделируемой системы в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют состояниям, а дуги – переходам, то при использовании введенных выше понятий применяются так называемые диаграммы состояний и переходов (State Transition Diagram). STD – это диаграмма, на которой изображается конечный автомат, к которому относятся простые состояния, переходы и вложенные композитные состояния. Изначальная концепция STD была разработана Дэвидом Хэрелом (David Harel).

Как видно из схемы, алгоритм работы контроллера определяется набором функциональных блоков, связей между ними и их характеристиками (стационарные или нестационарные блоки), а также уставками и машиной состояний. Машина состояний должна иметь наиболее простое и формальное представление, которое может дать автоматный подход.

В контексте САиУЗ актуально научное осмысление автоматного подхода. Для создания научно обоснованного метода построения программно-алгоритмического обеспечения конфигурируемых контроллеров должна быть решена задача автоматного подхода для описания поведенческой модели.

Для описания поведенческой модели сложной системы управления при помощи автоматного подхода должен быть решен вопрос о взаимодействии автоматов, описывающих поведение зависимых процессов (синхронных) и независимых (асинхронных). Причем решение данной задачи должно учитывать необходимость сохранения наглядности данного подхода, и простоту анализа.

Коротко об авторах

Махмутов Н.Г. – аспирант, Московский государственный горный университет.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ			
ДАО КХАНЬ ХОАЙ	Разработка цифровых методов трансформирования и воспроизведения сверхбольших массивов видеоданных	25.00.35	к.т.н.

© Ю.Е. Зюзичева, 2006

УДК 622.647.2

Ю.Е. Зюзичева

МОДЕЛЬ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА, РАСПОЛОЖЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДЛЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА УГЛА НАКЛОНА

Семинар № 13

Развитие горнодобывающей промышленности связано с увеличением использования конвейерного транспорта, заменяющего транспортирование с помощь вагонеток, самосвалов и т.п. Это ставит перед нами задачу создать систему автоматического управления движением ленты конвейера, которая позволит увеличить производительность и снизить затраты на транспортировку. Чтобы создать такую систему требуется математическая модель, которая достаточно точно описывала бы реальный объект – движение ленты.

На основе научных трудов Запенина И.В. и Дмитриевой В.В. мною разработана модель ленточного конвейера с однобарабанным приводом и натяжным устройством, расположенным на сбегающей ветви ленты непосредственно у привода.

На рис. 1 представлена расчетная схема конвейера с однобарабанным приводом и натяжным устройством, расположенным в головной части конвейера.

На рис. 1 используются следующие обозначения:

$X_1 \ldots X_6$, $\dot{X}_1 \ldots \dot{X}_6$, $\ddot{X}_1 \ldots \ddot{X}_6$ – деформации, скорости и ускорения сосредото-

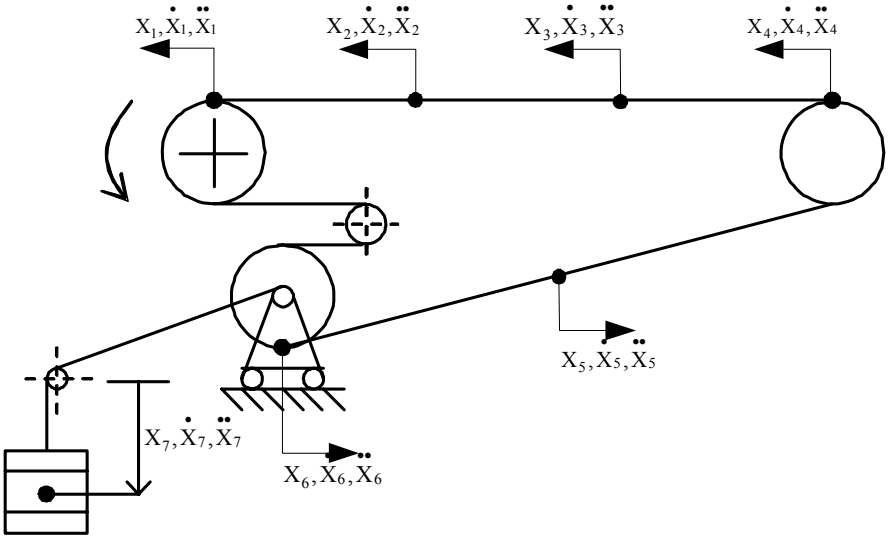


Рис. 1. Расчетная схема конвейера

ченных масс ленты конвейера,

X_7, $\dot{X}_7$, $\ddot{X}_7$ – перемещение, скорость и ускорение перемещения натяжного устройства.

Запенин И.В. разработал конечномерную модель конвейера, но нужно было получить модель в форме, допускающей управление. Дмитриева В.В. разработала систему управления, но в ее модели не учитывался угол наклона конвейера к горизонту.

При составлении модели обобщенными переменными приняты координаты положения шести масс и их скорости перемещения, а так же положение и скорость натяжного устройства. При построении модели представим распределенную массу ленты четырьмя массами на грузовой ветви и двумя на порожней.

При выборе расчетных схем и составлении дифференциальных уравнений движения ленточного конвейера принимаем следующие допущения:

1. Трасса конвейера прямолинейна и имеет постоянный угол наклона β;
2. Трансмиссионные валы и муфты считаем абсолютно жесткими и приводим массу приводов к ободам приводных барабанов;
3. Считаем на загруженных участках массу груза и вращающихся частей ролико-опор равномерно распределенной;
4. Движение ленты и груза совместное; проскальзывания ленты относительно роликов отсутствует;
5. Лента рассматривается не как гибкая нить, а как упруго-вязкий стержень;
6. Учитывая рассеяния энергии при колебаниях в результате внутреннего трения в материале ленты, считаем, что сила внутреннего трения пропорциональна скорости деформации;
7. Пренебрегаем массой хвостового и отклоняющегося барабанов;
8. Коэффициенты сопротивления движению на груженой и порожней ветвях остаются постоянными в процессе нестационарного движения.

Замкнутый контур ленты представляет собой систему с бесконечно большим числом степеней свободы, а динамические процессы в такой системе описываются дифференциальными уравнениями в частных производных от двух независимых переменных. Однако такие уравнения не решаются на цифровых ЭВМ. Поэтому необходимо перейти к условной механической системе с конечным числом степеней свободы. Совершенно очевидно, что результаты решения такой условной системы будут отличаться от точного решения, т.е. решение будет приближенным, причем степень погрешности будет уменьшаться при увеличении числа степеней свободы.

Полученная по общей схеме уравнения Лагранжа математическая модель, представляет собой систему из семи нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих совместное движения ленты с грузом (см. уравнения 1-7), где $q_г$, $q_п$ – погонный вес движущихся частей соответственно груженой и порожней ветвей; $L_п = \frac{L}{2}$ – расстояние между двумя рассматриваемыми точками ленточного конвейера на порожней ветви; $L_г = \frac{L}{3}$ – расстояние между двумя рассматриваемыми точками ленточного конвейера на порожней ветви; L1– длина участка ленты между приводом и натяжным барабаном; $m_{пр}$ – масса вращающихся частей электродвигателя, редуктора, муфт и приводного барабана, приведенная к ободу барабана; $G_г$ – вес натяжного груза; C_1, C_2, C_3,

$$1.\quad \left[\ddot{X}_1\cdot(2\cdot m_Г+2\cdot m_{пр1}+m_{ПР})+\ddot{X}_2\cdot(m_Г)+\ddot{X}_6\cdot(m_{пр1})\right]+\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_1\right)\times$$

$$\times\left[0.5\cdot\cos(\beta)\cdot(q_г\cdot Lг\cdot\omega`+q_п\cdot L1\cdot\omega``)+\sin(\beta)\cdot\left(\frac{q`_г\cdot Lг+q`_п\cdot L1}{2}\right)\right]-$$

$$-\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_C-\dot{X}_1\right)\cdot\left[\frac{M_{П1}}{R_Б}\right]+\left[\dot{X}_1\cdot(\eta^*+\eta^{**})-\dot{X}_2\cdot(\eta^*)-\dot{X}_6\cdot(\eta^*)\right]+$$

$$+\left[X_1\cdot(C_1+C^*+0.25\cdot C_К)-X_2\cdot(C_1)-X_6\cdot(C^*+0.25\cdot C_К)-X_7\cdot(0.5\cdot C_К)\right]=0$$

$$2.\quad \left[\ddot{X}_1\cdot(m_Г)+\ddot{X}_2\cdot(4\cdot m_Г)+\ddot{X}_3\cdot(m_Г)\right]+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_2\right)\cdot(q_г\cdot\cos(\beta)\cdot Lг\cdot\omega`+\sin(\beta)\cdot q`_г\cdot Lг)\right]+$$

$$+\left[-\dot{X}_1\cdot(\eta^*)+\dot{X}_2\cdot(2\cdot\eta^*)-\dot{X}_3\cdot(\eta^*)\right]+\left[-X_1\cdot(C_1)+X_2\cdot(C_1+C_2)-X_3\cdot(C_2)\right]=0$$

$$3.\quad \left[\ddot{X}_2\cdot(m_Г)+\ddot{X}_3\cdot(4\cdot m_Г)+\ddot{X}_4\cdot(m_Г)\right]+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_3\right)\cdot(q_г\cdot\cos(\beta)\cdot Lг\cdot\omega`+\sin(\beta)\cdot q`_г\cdot Lг)\right]+$$

$$+\left[-\dot{X}_2\cdot(\eta^*)+\dot{X}_3\cdot(2\cdot\eta^*)-\dot{X}_4\cdot(\eta^*)\right]+\left[-X_2\cdot(C_2)+X_3\cdot(C_2+C_3)-X_4\cdot(C_3)\right]=0$$

$$4.\quad \left[\ddot{X}_2\cdot(m_Г)+\ddot{X}_3\cdot(2\cdot m_Г+2\cdot m_П)+\ddot{X}_4\cdot(m_П)\right]+$$

$$+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_4\right)\left[0.5\cdot\cos(\beta)\cdot(q_г\cdot Lг\cdot\omega`+q_п\cdot Lп\cdot\omega``)+\sin(\beta)\cdot\left(\frac{q`_г\cdot Lг-q`_п\cdot Lп}{2}\right)\right]\right]+$$

$$+\left[-\dot{X}_2\cdot(\eta^*)+\dot{X}_3\cdot(2\cdot\eta^*)-\dot{X}_4\cdot(\eta^*)\right]-\left[X_2\cdot(C_2)+X_3\cdot(C_2+C_3)-X_4\cdot(C_3)\right]=0$$

$$5.\quad \left[\ddot{X}_1\cdot(m_П)+\ddot{X}_4\cdot(4\cdot m_П)+\ddot{X}_5\cdot(m_П)\right]+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_4\right)\cdot(q_п\cdot\cos(\beta)\cdot Lп\cdot\omega``-\sin(\beta)\cdot q`_п\cdot Lп)\right]+$$

$$+\left[-\dot{X}_3\cdot(\eta^*)+\dot{X}_4\cdot(\eta^*)-\dot{X}_5\cdot(2\cdot\eta^*)\right]+\left[-X_3\cdot(C_3)+X_4\cdot(C_3+C_4)-X_5\cdot(C_4)\right]=0$$

$$6.\quad \left[\ddot{X}_1\cdot(m_{пр1})+\ddot{X}_5\cdot(m_П)+\ddot{X}_6\cdot(2\cdot m_П+2\cdot m_{пр1})\right]+$$

$$+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_6\right)\cdot\left[0.5\cdot\cos(\beta)\cdot(q_п\cdot Lп\cdot\omega`+q_п\cdot L1\cdot\omega``)+\sin(\beta)\cdot q`_п\cdot\left(\frac{L1-Lп}{2}\right)\right]\right]+$$

$$+\left[-\dot{X}_1\cdot(\eta^{**})-\dot{X}_5\cdot(\eta^*)+\dot{X}_6\cdot(\eta^*+\eta^{**})\right]+\left[-X_1\cdot(C+0.25\cdot C_К)-X_5\cdot C+X_6\cdot(2\cdot C+0.25\cdot C_К)+X_7\cdot(0.5\cdot C_К)\right]=0$$

$$7.\quad \left[\ddot{X}_7\cdot(m_{Н.Г})\right]+\left[\operatorname{sgn}\left(\dot{X}_7\right)\cdot(G_Г\cdot f)\right]+\left[-X_1\cdot(0.5\cdot C_К)+X_6\cdot(0.5\cdot C_К)+X_7\cdot(C_К)\right]+(G_Г)=0$$

C_4, C_5, C_6, C^* – коэффициенты жесткости соответственно участков конвейерной ленты; $C_к$ – коэффициент жесткости каната; $M_{П1}$ – момент двигателя, приведенный к валу приводного барабана; $R_б$ – радиус приводного барабана; $\omega`, \omega``$ – коэффициенты сопротивления движению груженой и порожней ветвей; f – приведенный коэффициент сопротивления движению натяжных грузов; η^*, η^{**} – приведенные коэффициенты вязки; $X`_c$ – скорость, соответствующая синхронной скорости ротора двигателя.

На основе полученных дифференциальных уравнений была построена схема моделирования. Компьютерное моделирование производилось в системе SIMULINK, входящей в пакет прикладных программ MATLAB. Этот про-

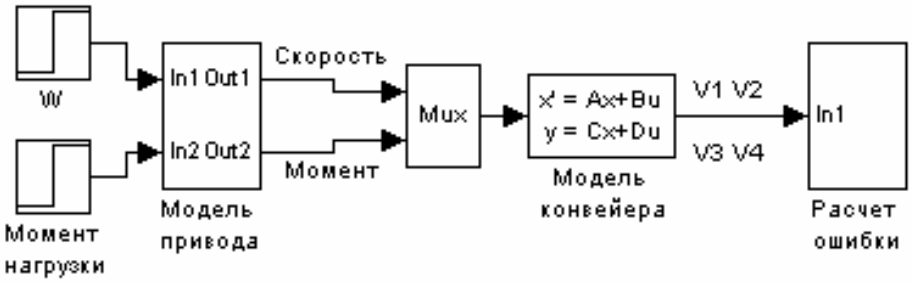


Рис. 2. Схема моделирования

граммный продукт позволяет выполнять моделирование динамических систем, описываемых обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями. Используя типовые блоки была собрана схема моделирования системы, включающая в себя: привод, контур ленты конвейера и натяжное устройство, а так же блок вычисления погрешности.

Одним из параметров этой системы является угол β - угол наклона конвейера к горизонту. Из практики известно, что угол β для данного конвейера должен находиться в пределах от -3^0 до 22^0.

На рис. 3 представлены переходные процессы скоростей сосредоточенных масс грузовой ветви. Для нас важным является факт совместного движения всех четырех масс. Главным критерием совместного движения является приблизительное равенство скоростей этих масс.

Изменяя угол β, мною установлено, что при любом его значении все переходные процессы заканчиваются примерно за 20 секунд. Таким образом, отклонение скоростей сосредоточенных масс по отношению к скорости сосредоточенной массы расположенной на головном барабане (эта скорость почти равна скорости привода) должно быть

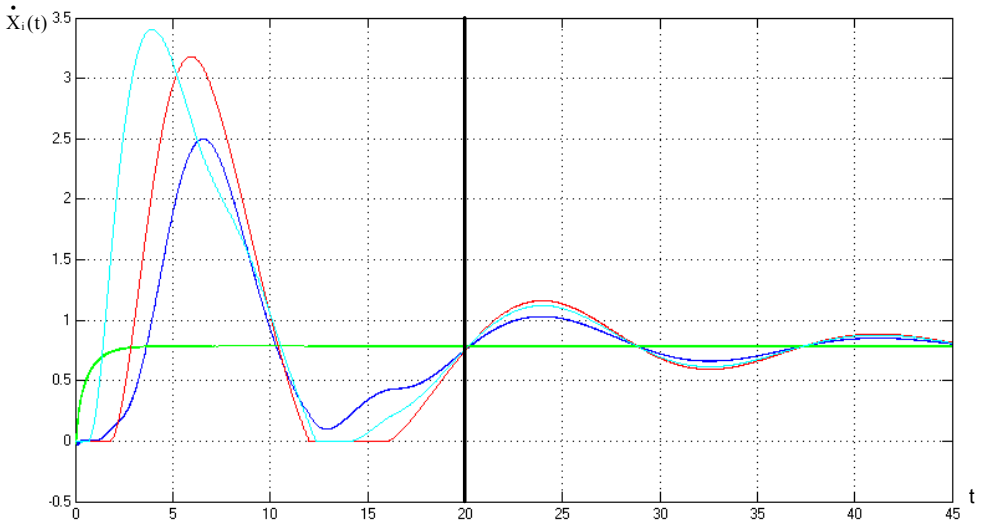


Рис. 3. Результат моделирования

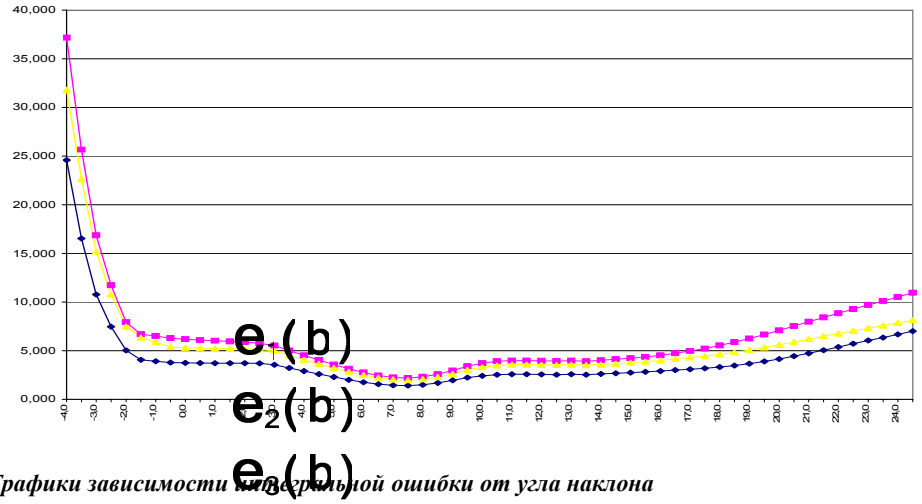


Рис. 4. Графики зависимости интегральной ошибки от угла наклона

минимальным. Данные отклонения зависит от качества переходного процесса. Переходной процесс должен быть установившимся и интегральная ошибка отклонения скоростей сосредоточенных масс должна быть минимальна.

Изменяя угол β в заданных пределах, мною получен ряд значений интегральных ошибок для скоростей сосредоточенных масс в точках 2, 3, 4. По ним построены изображенные на рис. 4 зависимости интегральной ошибки отклонения от угла β.

Как видно на рисунке эти три зависимости имеют минимум при одном и том же значении угла $\beta = 7{,}5^0$. Таким образом, полученное значение угла β является оптимальным в смысле качества переходного процесса для построенной мною математической модели.

Таким образом, мною получена модель ленточного конвейера, который расположен под углом к горизонту. Данная модель может быть использована для создания системы управления конвейером, расположенным под произвольным углом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриева В.В.* Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейер», 2005.
2. *Запенин И.В., Бельфор В.Е.* Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров, 1969.
3. *Певзнер Л.Д.* Теория систем управления, 2002.

Коротко об авторах

Зюзичева Ю.Е. – магистр кафедры «Автоматика и управление в технических системах», Московский государственный горный университет.